

**Optimización de canal abierto mediante el desarrollo y calibración de un modelo  
hidráulico. Caso de estudio: canal Tolima, municipio de Aracataca, departamento del  
Magdalena.**

**Investigador**

**Juan Antonio Olivero Torres**

**Universidad de la Costa**

**Programa Ingeniería Civil**

**Facultad de ingeniería civil y ambiental**

**Barranquilla**

**2018**

**Optimización de canal abierto mediante el desarrollo y calibración de un modelo hidráulico. Caso de estudio: canal Tolima, municipio de Aracataca, departamento del Magdalena.**

**Investigador**

**Juan Antonio Olivero Torres**

**Asesores**

**Ing. Armando Enrique Fontalvo Lascano**

**Ing. Gerald Leonidas Mestra Rodriguez**

**Universidad de la Costa**

**Programa Ingeniería Civil**

**Facultad de ingeniería civil y ambiental**

**Barranquilla**

**2018**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**Barranquilla, 27 de Agosto de 2018**

### **Dedicatoria**

A Dios dedico este triunfo.

A la memoria de mi tía “Ingrid Isabel Torres Parody”

A la memoria de mi abuela “Nelly Bossa de Olivero”

A ti “Madre”

A ti “Padre”

Y a mis hermanos: Juan Andrés Olivero Torres y Adriana María Olivero Torres.

**JUAN OLIVERO TORRES**

### **Agradecimientos**

A Dios quiero agradecer por todo, por conocerle y por guiarme en mi camino hacia esta meta que tanto anhelé.

A Denis Torres y A Juan Olivero mis padres que siempre me han apoyado y aconsejado para seguir adelante.

A Adriana María y Juan Andrés por soportarme en su vida como hermano y enseñarme el valor de la familia.

A mis compañeros de estudio por el tiempo compartido y por las grandes amistades que cultivé, especialmente a mis grandes compañeros de batallas: Samael Crespo, Jairo Díaz, Johan Blanco y Julio Heilbron.

A mis profesores por el conocimiento impartido en mí, especialmente a los Ingenieros Gerald Mestra Rodríguez por la confianza y apoyo ofrecido y también al Ingeniero Camilo Osorio García por la confianza y ayuda ofrecida.

Al grupo ANEICUC: grandes compañeros, una familia.

Al Ingeniero Armando Fontalvo Lascano por asesorarme en esta investigación y por su ayuda incondicional.

A mis grandes amigos en Barranquilla “Los Master”.

A mis demás familiares y amigos.

### Resumen

La optimización de canales abiertos es importante realizarla porque nos da la primera aproximación a las condiciones reales y de diseño de cualquier estructura hidráulica. También nos ayuda a minimizar el riesgo que ocurre en un canal, corrigiendo la eficiencia, eficacia y efectividad de los mismos. Además, los métodos de optimización despejan el camino hacia soluciones óptimas para cualquier experiencia en ingeniería. Estos métodos ayudan a tomar las decisiones más acertadas para encontrar la aproximación más cercana a la realidad y disminuir la incertidumbre de cualquier tipo de resultado. Actualmente, para el control óptimo de canales es necesario tener en cuenta las normativas nacionales e internacionales para el buen manejo del flujo libre, las cuales, se caracterizan por controlar los niveles de agua y los caudales representativos, minimizando los problemas que se puedan originar. También, la optimización de canales hidráulicos en Colombia considera factores vitales que involucran la generación de energía mediante las hidroeléctricas y el consumo de agua para abastecimiento de la población. Cabe precisar que la utilización de ecuaciones con diferentes parámetros, ayuda a plantear y resolver los problemas hidráulicos que se podrían originar en canales. Por ello, la propuesta busca diseñar, calibrar y optimizar canales abiertos con el fin de reducir los costos mediante la escogencia de la sección óptima en canales de conducción. El modelo propuesto describe las ecuaciones que permiten la solución de la problemática existente en un canal abierto y así obtener la condición más adecuada para resolver el problema hidráulico originado; por consiguiente, este estudio se basa en información secundaria, estudios previos y datos levantados en campo, que permitan seleccionar la condición más económica y acertada.

***Palabras clave:*** Flujo, Modelo, Sección, Velocidad, Calibración

### **Abstract**

The optimization of open channels is important because it is the first approach to the real and design conditions of any hydraulic structure. Therefore, we help minimize the risk that occurs in the channel, in order to correct the efficiency, effectiveness and effectiveness of the channel. However, optimization methods clear the way to optimal solutions to live in engineering. For what reason, these methods help us make the best decisions to find the closest approach to reality and reduce the uncertainty of any type of result. The optimal control of channels is a challenge of great importance at present, since it allows us to take into account the national and international regulations for the good management of free flow, which are characterized by controlling water levels and representative flows for Minimize the problems that may arise. In Colombia, the most important hydroelectric power plants are Miel I, Chivor, Guavio, Sogamoso, Urra I, among others. On the other hand, the optimization of channels involves factors of vital importance that intervene in the cost of construction, such as, for example, the volume of excavation and the surface of the coating; which comprises the optimum cross section of the channel. The use of equations with different parameters helps us to propose and solve the hydraulic problems that could arise. Therefore, the proposal seeks to design, calibrate and optimize open channels in order to reduce costs by choosing the most optimal section in driving channels. The proposed model describes the equations that allow the solution of the existing problem in an open channel and thus, obtain the most adequate condition to solve the hydraulic problem; this on the basis of secondary information, previous studies and data collected in the field, which allow selecting the optimum economic condition.

**Key words:** Flow, Modeling, Sections, Velocity, Calibration

## Contenido

<i>Introducción.....</i>	<i>21</i>
<i>1. Formulación del problema.....</i>	<i>22</i>
<i>2. Justificación.....</i>	<i>24</i>
<i>3. Objetivos.....</i>	<i>26</i>
3.1 General. ....	26
3.2 Específicos. ....	26
<i>4. Delimitación.....</i>	<i>27</i>
4.1 Delimitación temporal.....	27
4.2 Delimitación espacial. ....	27
<i>5. Marco referencial.....</i>	<i>30</i>
5.1 Aspectos de la zona de estudio (municipio de Aracataca). ....	30
5.1.1 Clima.....	30
5.1.2 Geología de la zona.....	31
5.1.3 Geomorfología. ....	32
5.2 Oferta y demanda hídrica. ....	32
5.3 Edificaciones adyacentes del canal. ....	33
<i>6. Aspectos generales de canales abiertos.....</i>	<i>35</i>
6.1 Canales naturales.....	35
6.2 Canales artificiales. ....	35



6.3	Canales revestidos.....	36
6.3.1	Tipos de revestimiento.....	37
6.4	Canales no revestidos.....	37
6.4.1	Velocidad máxima en canales no revestidos.....	38
6.5	Secciones transversales de un canal.....	38
6.6	Secciones típicas.....	40
6.7	Distribución de velocidades en una sección de canal.....	41
6.7.1	Velocidad mínima permisible.....	43
6.8	Pendientes de canal.....	43
6.9	Sección hidráulica óptima.....	44
6.10	Clasificación de flujos.....	44
6.10.1	Flujo rápidamente variado no permanente.....	45
6.10.2	Flujo laminar y flujo turbulento (efecto de la viscosidad).....	45
6.10.3	Flujo sub-crítico, crítico y supercrítico (efecto de la gravedad).....	48
6.11	Resalto hidráulico.....	49
6.12	Flujo permanente y flujo no permanente.....	49
6.12.1	Flujo permanente.....	49
7.	<i>Obras de control en canales de riego</i> .....	59
7.1	Estructuras de protección.....	59
7.2	Estructuras de cruce.....	59
8.	<i>Software</i> .....	59

8.1.1	Descripción del programa .....	59
8.1.2	Entrada de datos .....	60
8.1.3	Condiciones hidráulicas .....	64
9.	<i>Estado del arte</i> .....	65
10.	<i>Desarrollo del trabajo</i> .....	68
10.1	<i>Topografía del canal</i> .....	68
10.2	Hidrología del canal. ....	69
11.	<i>Caracterización de la cuenca</i> .....	71
11.1	Análisis hidrológico. ....	72
11.2	Procesamiento de datos. ....	74
11.2.1	Análisis de la precipitación. ....	74
11.2.2	Selección periodo de retorno .....	85
11.2.3	Estimación del caudal de precipitación.....	86
12.	<i>Toma de velocidades y cálculo de caudales.</i> .....	87
13.	<i>Simulación del canal de riego Tolima, con ayuda del software HEC-RAS</i> .....	92
13.1	Parámetros de diseño para la modelación (condiciones de fronteras). ....	92
13.2	Escenario 1 (modelación actual). ....	94
13.2.1	Abscisa 1050 a 700. Inicio de la modelación (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo). 94	
13.2.2	Abscisa 700 a 350. (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo). ....	96

13.2.3	Abscisa 350 a 0 (punto final de modelación). (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo)	99
13.3	Escenario 2 (modelación sin sedimentos sin calibrar)	105
13.3.1	Abscisa 1050 a 700. Inicio de la modelación (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo).	105
13.3.2	Abscisa 700 a 350. (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo).	108
13.3.3	Abscisa 700 a 350 (punto final de modelación). (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo).	112
13.4	Escenario 3 (modelación sin sedimentos calibrado).	114
13.4.1	Aplicación de Manning.	116
13.4.2	Abscisa 1050 a 900. Inicio de la modelación (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo). Calibrado.	124
13.4.3	Abscisa 900 a 650. (Sentido de aguas arriba hacia aguas abajo). Calibrado.	127
13.4.4	Abscisa 650 a 0. (Punto final de modelación). (Sentido de aguas arriba hacia aguas abajo). Calibrado.	130
13.5	Escenario 4 (modelación con sedimentos calibrado)	132
13.5.1	Abscisa 1050 a 900. Inicio de la modelación (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo). Calibrado.	137
13.5.2	Abscisa 900 a 650. (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo). Calibrado.	140
13.5.3	Abscisa 650 a 0. (Punto final de modelación). (Sentido de aguas arriba hacia aguas abajo). Calibrado.	142
13.6	Escenario 5 (sección trapezoidal) alternativa de solución 1.	145

13.6.1	Abscisas 1050 a 700. Inicio de la modelación (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo).	147
13.6.2	Abscisas 700 a 350. (Sentido de aguas arriba hacia aguas abajo). .....	149
13.6.3	Abscisas 350 a 0. (Punto final de modelación). (Sentido de aguas arriba hacia aguas abajo). .....	151
13.7	Escenario 6. (Sección rectangular) alternativa de solución 2.....	153
13.7.1	Abscisas 1050 a 700. Inicio de la modelación (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo).	154
13.7.2	Abscisas 700 a 350. (Sentido de aguas arriba hacia aguas abajo). .....	156
13.7.3	Abscisas 350 a 0. (Punto final de modelación). (Sentido de aguas arriba hacia aguas abajo). .....	159
14.	<i>Presupuestos de alternativas de solución.</i> .....	162
14.1	Sección trapezoidal alternativa de solución #1 .....	162
14.2	Sección rectangular alternativa de solución #2 .....	163
14.3	Limpieza del canal #3 .....	164
15.	<i>Resultados obtenidos.</i> .....	165
16.	<i>Conclusiones</i> .....	166
17.	<i>Recomendaciones</i> .....	167
18.	<i>Recursos</i> .....	168
19.	<i>Cronograma</i> .....	169
	<i>Referencias</i> .....	170

## Lista de tablas y figuras

### Tablas

Tabla 1. Precipitaciones en los distintos tiempos de duración.....	76
Tabla 2. Intensidad de precipitación por Duración de lluvia y Frecuencia .....	77
Tabla 3. Resultados de análisis de regresiones para parámetros IDF. ....	78
Tabla 4.. Resultados de análisis de regresiones para parámetros IDF. ....	80
Tabla 5. Análisis de regresión potencial para la determinación de parámetros de curvas de IDF. .....	82
Tabla 6. Relación Intensidad, duración frecuencia para la cuenca Canal Tolima. ....	84
Tabla 7. Características de la cuenca estudiada. ....	86
Tabla 8. Tabla de áreas sección K0+940 .....	88
Tabla 9. Coordenadas de la sección transversal.....	89
Tabla 10. Velocidades.....	90
Tabla 11. Caudales de totales de las secciones críticas de estudio .....	91
Tabla 12. Abscisa 1050 a 700. Inicio de la modelación (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo).....	94
Tabla 13. Abscisa 700 a 350. Inicio de la modelación (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo).....	96
Tabla 14. Abscisa 350 a 0 (punto final de modelación). (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo).....	99
Tabla 15. Abscisa 1050 a 700. inicio de la modelación (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo).....	105
Tabla 16. Abscisa 700 a 350. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo). ....	108

Tabla 17. Abscisa 350 a 0 (punto final de modelación). (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo).....	112
Tabla 18. Alturas medidas en campo (lámina de agua). ....	114
Tabla 19. Alturas modeladas (Modelo Hec Ras). ....	114
Tabla 20. Error porcentual en cada abscisa. ....	115
Tabla 21. Tabla de resultados abscisa 940. ....	116
Tabla 22. Resultados obtenidos en las abscisas. ....	117
Tabla 23. Mannings para tramos a modelar. ....	117
Tabla 24. Resultados obtenidos de calibración #1. ....	120
Tabla 25. Resultados obtenidos de calibración. ....	121
Tabla 26. Resultados obtenidos de calibración. ....	122
Tabla 27. Resultados obtenidos de calibración. ....	123
Tabla 28. Descripción de Manning en los tramos. ....	124
Tabla 29. Abscisa 1050 a 700. Inicio de la modelación (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo).....	124
Tabla 30. Abscisa 900 a 650. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo). ....	127
Tabla 31. Abscisa 650 a 0. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo). ....	130
Tabla 32. Alturas medidas en campo vs Altura modelada con N de 0.02 ....	132
Tabla 33. Alturas medidas en campo vs Altura modelada con N diferentes. ....	132
Tabla 34. Resultados obtenidos de calibración #1. ....	133
Tabla 35. Resultados obtenidos de varias calibraciones. ....	134
Tabla 36. Resultados obtenidos de varias calibraciones. ....	135
Tabla 37. Resultados obtenidos de varias calibraciones. ....	136

Tabla 38. Abscisa 1050 a 700. inicio de la modelación (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo).....	137
Tabla 39. Abscisa 900 a 650. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo). ....	140
Tabla 40. Abscisa 650 a 0. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo). ....	142
Tabla 41. Abscisa 1050 a 0. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo). ....	147
Tabla 42. Abscisa 700 a 350. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo). ....	149
Tabla 43. Abscisa 350 a 0. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo). ....	151
Tabla 44. Abscisa 1050 a 700. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo). ....	154
Tabla 45. Abscisa 700 a 350. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo). ....	156
Tabla 46. Abscisa 350 a 0. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo). ....	159
Tabla 47. Presupuesto alternativa de solución #1 sección trapezoidal. ....	162
Tabla 48. Presupuesto alternativa de solución #2 sección rectangular. ....	163
Tabla 49. Presupuesto alternativa de solución #1 sección trapezoidal. ....	164

## **Figuras**

<i>Figura 1.</i> Fotografía de los canales circulares del puente de línea del ferrocarril sobre el canal Tolima. ....	22
<i>Figura 2.</i> Ubicación del Municipio de Aracataca.....	28
<i>Figura 3.</i> El proyecto se localiza en el municipio de Aracataca, departamento del Magdalena. .	29
<i>Figura 4.</i> Localización del canal Tolima. ....	29
<i>Figura 5.</i> Hidrografía de la Ciénaga Grande de Santa Marta. ....	31
<i>Figura 6.</i> Canal Tolima Cerca de viviendas cercanas. ....	34
<i>Figura 7.</i> Elementos Geométricos de la sección transversal de un canal. ....	39

<i>Figura 8.</i> Propiedades de los canales hidráulicos.....	40
<i>Figura 9.</i> Distribución de velocidad de un canal rectangular.....	42
<i>Figura 10.</i> Curvas comunes de igual velocidad en diferentes secciones de canal .....	42
<i>Figura 11.</i> Diagrama de Moody.....	47
<i>Figura 12.</i> Valores del coeficiente n en la ecuación de Manning. Canales recubiertos o revestidos.....	56
<i>Figura 13.</i> Valores del coeficiente n en la ecuación de Manning. Canales recubiertos o revestidos.....	57
<i>Figura 14.</i> Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad mediante la ecuación de Cowan. .....	58
<i>Figura 15.</i> Pantalla principal del programa HEC-RAS .....	61
<i>Figura 16.</i> Ventana de datos geométricos .....	62
<i>Figura 17.</i> Ventana de datos geométricos para secciones transversales .....	63
<i>Figura 18.</i> Ventana con datos hidraulicos (condiciones de contorno) .....	64
<i>Figura 19.</i> Ventana con datos hidraulicos (caudales).....	64
<i>Figura 20.</i> Perfil del canal de riego Tolima.....	68
<i>Figura 21.</i> Plano en planta del canal de riego Tolima.....	69
<i>Figura 22.</i> Trazado Canal Tolima, bocatoma Antioquia sobre el río Aracataca.....	71
<i>Figura 23.</i> Delimitación de la cuenca del Canal Tolima, trazados Canal Tolima y río Aracataca. .....	72
<i>Figura 24.</i> Estaciones IDEAM pluviométricas Canal Tolima.....	73
<i>Figura 25.</i> Distribución de probabilidades pluviométricas mediante Gumbel.....	75
<i>Figura 26.</i> Grafica de regresión T= 50 años de resultados tomados de la tabla.....	79



<i>Figura 27.</i> Grafica de regresión T= 100 años de resultados tomados de la tabla.....	81
<i>Figura 28.</i> Grafica de regresión potencial de resultados tomados de la tabla. ....	83
<i>Figura 29.</i> Curva resultante de Intensidad – Duración – Frecuencia de la zona objeto de estudio Cuenca canal Tolima.....	85
<i>Figura 30.</i> Sección transversal K0+940 inicio del canal.....	87
<i>Figura 31.</i> Esquema básico de sección para su análisis de velocidades.....	88
<i>Figura 32.</i> tramo del canal entre la abscisa 1050 a 700.....	94
<i>Figura 33.</i> sección transversal 770 con desbordamiento lado izquierdo.....	95
<i>Figura 34.</i> sección transversal 730 con desbordamiento lado izquierdo.....	95
<i>Figura 35.</i> tramo del canal entre la abscisa 700 a 350.....	96
<i>Figura 36.</i> Sección transversal 690 con desbordamiento lado derecho.....	97
<i>Figura 37.</i> sección transversal 531.35 con desbordamiento lado derecho. ....	97
<i>Figura 38.</i> puente canal abscisa 531, aumento de lámina de agua debido a descarga teniendo encuentra la sedimentación dentro de la tubería. ....	98
<i>Figura 39.</i> puente canal en su máxima capacidad de drenaje, se evidencia subida de lámina de agua por sedimentos en la tubería abscisa 531.35. ....	98
<i>Figura 40.</i> Tramo del canal apartir de la abscisas K0+350 a K0+000. ....	100
<i>Figura 41.</i> sección transversal K0+140 con desbordamiento, en ambos lados.....	101
<i>Figura 42.</i> Sección transversal k0+095.68 con desbordamiento, en ambos lados. ....	101
<i>Figura 43.</i> Sección transversal K0+070 con desbordamiento, lado derecho .....	102
<i>Figura 44.</i> Sección transversal K0+050 con desbordamiento, lado derecho. ....	103
<i>Figura 45.</i> Sección transversal K0+030 con desbordamiento,ambos lados .....	103
<i>Figura 46.</i> Sección transversal K0+020 con desbordamiento,ambos lados .....	104

<i>Figura 47.</i> Sección transversal K0+020 con desbordamiento,lado derecho .....	104
<i>Figura 48.</i> Tramo del canal entre la abscisa 1050 a 700. ....	105
<i>Figura 49.</i> Sección transversal 1050 con sedimento. ....	106
<i>Figura 50.</i> Sección transversal 1050 sin sedimento. ....	106
<i>Figura 51.</i> Sección transversal 1050 modelada sin sedimento. ....	107
<i>Figura 52.</i> Sección transversal 700 modelada sin sedimento. ....	107
<i>Figura 53.</i> Tramo del canal apartir de la abscisas 700 a 350. ....	108
<i>Figura 54.</i> Aumento de lámina de agua en puente canal abscisa 531, no presenta desbordamiento .....	109
<i>Figura 55.</i> Entre la abscisa 560 a 550 la lámina de agua no presenta borde libre, lo que quiere decir que se encuentra a punto de desbordarse. ....	109
<i>Figura 56.</i> Sección transversal 700 modelada sin sedimento. ....	110
<i>Figura 57.</i> Puente canal con sedimentos abscisa 531. ....	110
<i>Figura 58.</i> Puente canal sin sedimentos abscisa 531. ....	111
<i>Figura 59.</i> Sección transversal 350 modelada sin sedimento. ....	111
<i>Figura 60.</i> Tramo del canal apartir de la abscisas 350 a 0. ....	112
<i>Figura 61.</i> Sección transversal 300 modelada sin sedimento. ....	113
<i>Figura 62.</i> Sección transversal 0 modelada sin sedimento. ....	113
<i>Figura 63.</i> Comparación de Y medido Vs Y modelado. ....	115
<i>Figura 64.</i> Resultado de calibración con el Q. funcionamiento. ....	118
<i>Figura 65.</i> Resultado de calibración con el Q. funcionamiento + Q. Hidrología. ....	119
<i>Figura 66.</i> Resultado de calibración con el Q. funcionamiento + Q. Hidrología, abscisas 1050 a 900. ....	125

<i>Figura 67. Sección transversal 1050 calibrado.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 68. Sección transversal 900 calibrado.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 69. Resultado de calibración con el Q. funcionamiento + Q. Hidrología, abscisas 900 a 650.....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 70. Sección transversal 894.84 calibrado. ....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 71. Sección transversal 650 calibrado.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 72. Resultado de calibración con el Q. funcionamiento + Q. Hidrología, abscisas 900 a 650.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 73. Sección transversal 640 calibrado.....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 74. Sección transversal 0 calibrado. ....</i>	<i>132</i>
<i>Figura 75. Comparación de Y medido vs Y modelado. ....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 76. Resultado de calibración con el Q. funcionamiento + Q. Hidrología, abscisas 1050 a 900.....</i>	<i>138</i>
<i>Figura 77. Sección transversal 1050 calibrado.....</i>	<i>139</i>
<i>Figura 78. Sección transversal 900 calibrado.....</i>	<i>139</i>
<i>Figura 79. Resultado de calibración con el Q. funcionamiento + Q. Hidrología, abscisas 900 a 650.....</i>	<i>140</i>
<i>Figura 80. Sección transversal 894.84 calibrado.....</i>	<i>141</i>
<i>Figura 81. Sección transversal 650 calibrado.....</i>	<i>141</i>
<i>Figura 82. Resultado de calibración con el Q. funcionamiento + Q. Hidrología, abscisas 900 a 650.....</i>	<i>143</i>
<i>Figura 83. Sección transversal 640 calibrado.....</i>	<i>143</i>
<i>Figura 84. Sección transversal 630 calibrado.....</i>	<i>144</i>

<i>Figura 85.</i> Sección transversal 580 calibrado.....	144
<i>Figura 86.</i> Sección transversal 0 calibrado. ....	145
<i>Figura 87.</i> Abscisa 1050 a 700. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo). ....	147
<i>Figura 88.</i> Sección transversal sección abscisa 1050.....	148
<i>Figura 89.</i> Sección transversal sección abscisa 700.....	148
<i>Figura 90.</i> Abscisa 700 a 350. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo). ....	149
<i>Figura 91.</i> Comportamiento del canal con la nueva sección en puente canal abscisa 531. ....	150
<i>Figura 92.</i> Sección transversal puente canal. ....	150
<i>Figura 93.</i> Sección transversal abscisa 350.....	151
<i>Figura 94.</i> Tramo del canal apartir de la abscisas 350 a 0. ....	151
<i>Figura 95.</i> Sección transversal abscisa 150.....	152
<i>Figura 96.</i> Sección transversal abscisa 0.....	153
<i>Figura 97.</i> Tramo del canal apartir de la abscisas 1050 a 700. ....	154
<i>Figura 98.</i> Sección transversal abscisa 1050.....	155
<i>Figura 99.</i> Sección transversal abscisa 700.....	155
<i>Figura 100.</i> Tramo del canal apartir de la abscisas 700 a 350. ....	156
<i>Figura 101.</i> Comportamiento del canal con la nueva sección en puente canal abscisa 531. ....	157
<i>Figura 102.</i> Comportamiento del canal con la nueva sección en puente canal abscisa 531. ....	157
<i>Figura 103.</i> Sección transversal 350. ....	158
<i>Figura 104.</i> Tramo del canal apartir de la abscisas 700 a 350. ....	159
<i>Figura 105.</i> Sección transversal abscisa 150.....	160
<i>Figura 106.</i> Sección transversal abscisa 0.....	161

### **Introducción.**

Los canales de riego para cultivos en los últimos años se han intensificado en el departamento del Magdalena, debido a las actividades económicas del sector que ayudan de manera directa con la distribución del agua en la zona. Por ello, el canal Tolima ubicado en el municipio de Aracataca, se usa como ayuda en la distribución y este a su vez, presenta problemas de sedimentación que ocurren cuando existen eventos de lluvia asociados al tipo de estructuras de drenaje. Adicionalmente, este canal no cuenta con una capacidad hidráulica para la evacuación de las aguas, incurriendo de manera amenazante en la inundación del municipio.

Por todo lo anterior, el paso a seguir es investigar detalladamente la hidrología e hidráulica del canal, partiendo de metodologías ya establecidas, y así encontrar la mejor solución a la problemática presentada.

La utilización de herramientas computacionales como Hec-Ras nos ayudan a modelar el canal Tolima, mediante técnicas de campo como levantamientos topográficos ya establecidos, donde se conocerán diferentes parámetros como la inundación y los problemas generados por el estancamiento de aguas en las estructuras de drenaje. Así mismo, en este estudio se realizaron modelaciones para presentar la solución más acertada hidráulica y económicamente.

Finalmente, los resultados obtenidos de esta investigación deben plasmarse en una serie de resultados técnicos que ayudan a tomar decisiones de manera positiva, basados en criterios ingenieriles integrales que integran los diferentes puntos de vistas.

## 1. Formulación del problema.

En el casco urbano del municipio, el río Aracataca es utilizado para alimentar los canales de riego Antioquia y Tolima, los cuales, atraviesan la población y, en época de creciente, presentan desbordamiento e inundaciones en las inmediaciones de los mismos. Además, la población manifiesta que el puente de la vía del ferrocarril que atraviesa el canal, ocasiona problemas de inundación por la baja capacidad hidráulica de los canales circulares instalados, que atraviesan el terraplén de la vía férrea que pasa por el municipio. Esta situación se evidencia en la figura 1.



*Figura 1*<sup>1</sup>. Fotografía de los canales circulares del puente de línea del ferrocarril sobre el canal Tolima.

---

<sup>1</sup> Estudio hidrológico e hidráulico para el sector del cruce de la vía férrea con el canal ubicado en el p.k. 881+541 de la vía férrea Chiriguaná – santa marta en vía única en el municipio de Aracataca. Memorias de cálculo box culvert sobre el canal Tolima a la altura de la vía férrea Chiriguaná – Santa Marta- Informe Técnico AQUA ESTUDIOS Y DISEÑOS INGENIERÍA SAS.

Es claro que la inundación se presenta por la capacidad insuficiente del canal abierto para drenar el agua en época de lluvia. Por ello, se alcanzan a observar algunas variables que comprometen el buen funcionamiento del canal, como lo son: la irregularidad de la sección transversal del canal, la pendiente, el revestimiento y la falta de mantenimiento del mismo.

Estas variables combinadas tienen un efecto negativo significativo sobre los parámetros de diseño como la rugosidad, la velocidad y el área de sección transversal; que podrían originar problemas de sedimentación y a su vez, problemas de estancamiento de aguas que favorecen el crecimiento de vectores que afectan la salud pública de los habitantes alrededor del canal.

Por tal motivo, para solucionar este tipo de problemas es vital proyectar cualquier solución o modificación del canal a largo plazo, utilizando distintos periodos de retorno para garantizar la estabilidad de la solución en el tiempo. Para este fin, se hace necesario elaborar un modelo que permita simular las condiciones del flujo sobre la sección transversal del canal, que nos dé una viabilidad en la solución desde el punto de vista hidráulico. Así mismo, el estudio plantea un modelo que contiene parámetros constructivos, cinemáticos, geométricos, hidráulicos e hidrológicos.

En este contexto se propone la siguiente pregunta problema de investigación: ¿Cuáles son los valores de las dimensiones del canal de riego Tolima que garantizan el correcto funcionamiento y eviten inundaciones en tiempos de lluvia y crecientes? Para responder a esta pregunta, se propone un enfoque de simulación del canal abierto estando en condiciones normales de funcionamiento y en tiempos de lluvia, mediante la elaboración de un modelo hidráulico que permita predecir el comportamiento del nivel de agua en el canal para varias secciones transversales y condiciones de mantenimiento.

## 2. Justificación.

En el diseño y replanteo del canal abierto del sistema de riego en el municipio de Aracataca, más exactamente el canal Tolima, se hace trascendental considerar la solución del problema actual, ya que, se observan problemas evidentes en las inundaciones del mismo que se originan en tiempo de lluvia. Este canal debe cumplir con la función de transportar y evacuar el agua proveniente de la cuenca hidrográfica de la zona de estudio de manera segura y eficiente.

De acuerdo a las condiciones actuales del canal, se evidencian problemas debido algunos parámetros que son considerados en los diseños, como lo son: el revestimiento y la pendiente del canal, que podrían originar estancamiento de sedimentos en zonas de baja pendiente en las diferentes partes. Así mismo, el cambio de la forma en la sección transversal también origina problemas de inundación, ya que, le quita capacidad de transporte de aguas sobre el canal, que origina desbordamientos de agua sobre el tramo de sección del canal. Por lo anterior, se debe realizar un rediseño y calibración de un modelo que satisfaga este tipo de problemas para mejorar la calidad de vida de los pobladores que se encuentran alrededor de él.

Por otra parte, se hace indispensable evaluar el estado actual del diseño y condiciones del canal, para así, proyectar las soluciones o modificaciones del canal considerando diferentes periodos de tiempo. De igual forma, Se requiere implementar una simulación que nos permita evaluar diferentes alternativas de solución desde el punto de vista hidrológico e hidráulico, y que nos arroje la mejor alternativa a menor costo posible de operación.



El presente estudio contempla un modelo computacional que tiene en cuenta diferentes parámetros hidráulicos e hidrológicos que recopilan toda la información necesaria para llegar a una solución integral de operación del canal.

### **3. Objetivos.**

#### **3.1 General.**

- Determinar las dimensiones óptimas de un canal abierto mediante el desarrollo y calibración de un modelo hidráulico, caso de estudio: Canal Tolima, Municipio de Aracataca, Departamento del Magdalena.

#### **3.2 Específicos.**

- Determinar la ubicación de los puntos críticos del canal que presentan riesgo de desbordamiento.
- Cuantificar la cantidad de sedimentos existentes en el canal de riego.
- Desarrollar y calibrar un modelo para predecir el comportamiento hidráulico del canal.
- Determinar las dimensiones del canal de riego que garantice la funcionalidad y la seguridad de su operación.

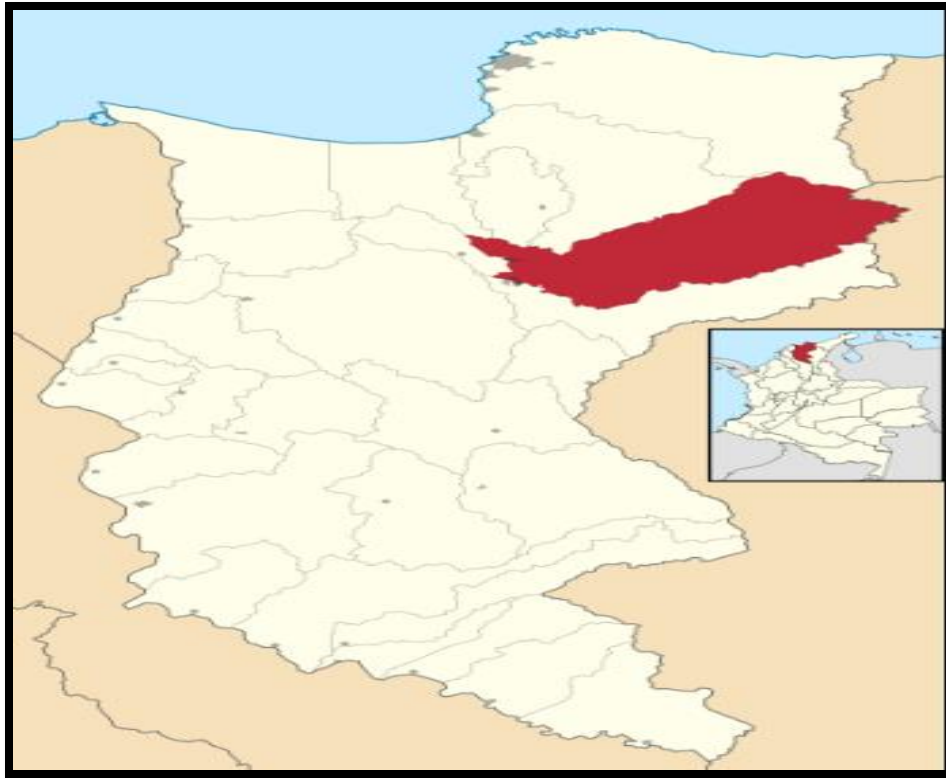
#### **4. Delimitación.**

##### **4.1 Delimitación temporal.**

El presente proyecto de investigación se desarrolló en un período de 13 meses, el cual, inició en marzo del 2017 y finalizó en abril 21 del 2018. Según el Plan de Desarrollo Municipal 2012-2015, el municipio de Aracataca presenta una configuración política administrativa conformada por un sector urbano determinado por el perímetro de la cabecera municipal, zonificada en 33 barrios; y un sector rural, está constituido por seis corregimientos, 11 veredas y tres centros poblados indígenas. Abarca una extensión territorial de 1.736 km<sup>2</sup>, cuenta con una población de 39.020 habitantes; distribuidos 68% en el área urbana y 32% en el área rural. Según el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD (2011), el municipio presenta un Índice de Ruralidad de 49.8%, lo que implica en términos de la distribución territorial un grado de ruralidad medio, superior al Índice de Ruralidad del Departamento del Magdalena que es de 40.87%.

##### **4.2 Delimitación espacial.**

El proyecto de investigación se desarrolló en el departamento del Magdalena específicamente en el municipio de Aracataca. Nuestro estudio de caso se basa en el canal Tolima que pertenece a unas de las vertientes hidrográficas que atraviesan el municipio. La ubicación geoespacial de la cabecera municipal se encuentra ubicada a los 10° 36' Latitud Norte. 74° 12' Longitud Oeste. Limita al norte con los municipios de Ciénaga, Santa Marta y Zona Bananera; al sur con los municipios de Fundación y Pivijay; al este con el Departamento del Cesar y al oeste con los municipios de Pivijay y El Retén.



*Figura 2<sup>2</sup>*. Ubicación del Municipio de Aracataca

---

<sup>2</sup> <https://www.goplacit.com/co/casa/venta/localidad/6336-aracataca>

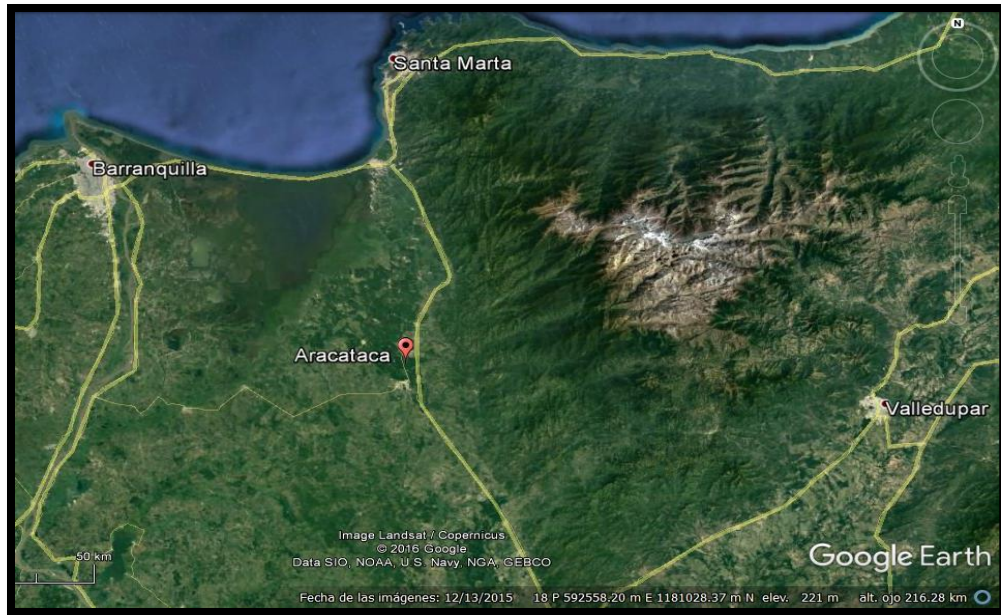


Figura 3<sup>3</sup>. El proyecto se localiza en el municipio de Aracataca, departamento del Magdalena.

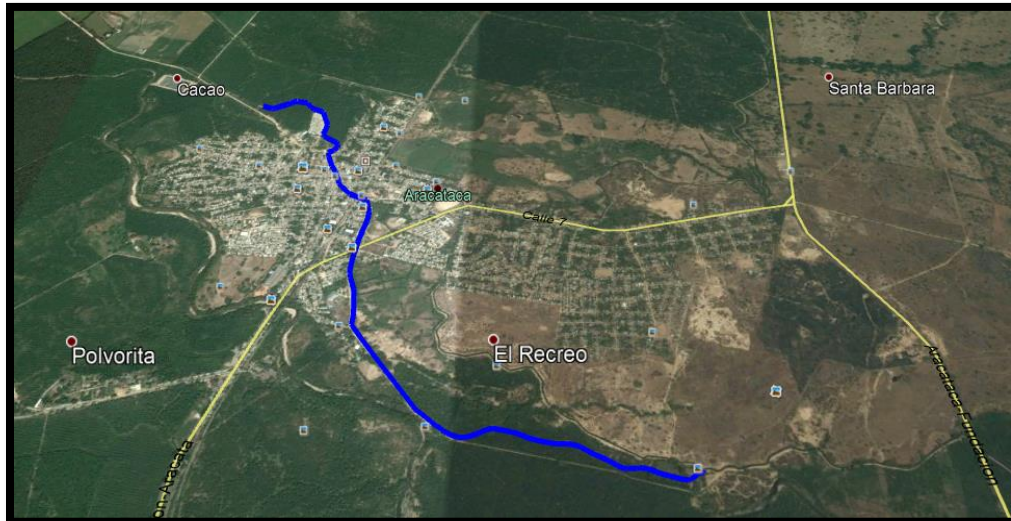


Figura 4<sup>4</sup>. Localización del canal Tolima.

<sup>3 4</sup> Ortofotografía de Goole Earth

## 5. Marco referencial.

### 5.1 Aspectos de la zona de estudio (municipio de Aracataca).

#### 5.1.1 *Clima.*<sup>5</sup>

El Municipio de Aracataca está influenciado por el grupo climático tropical lluvioso y por el tipo de clima de sabana (AW". Húmedo seco). Este clima se caracteriza por poseer dos estaciones secas. Las condiciones climáticas varían notablemente de acuerdo a la altitud; encontrándose desde el clima sub-nivel, clima muy frío y frío húmedo, en las partes más altas los climas frío húmedo y muy húmedo en la zonas alrededor y debajo del páramo, pasando por climas templado húmedo y muy húmedo en la zona cafetera en el paisaje de montaña y lomerío (1.000 y 2.000 msnm) llegando hasta climas cálido húmedo, cálido seco y muy seco en la parte baja; presentándose una gradiente de temperatura de 1.228°C/100m.

La humedad relativa se mantiene alrededor del 90% en los meses lluviosos con una ligera variación en el mes de julio; en los meses secos varía entre el 84% y 88%. Las precipitaciones hasta los 100msnm fluctúan entre los 267 y los 1637 mm anuales según la estación meteorológica y sobre los 400 hasta los 2.200 msnm se mantiene entre los 2.200 y los 2.500 mm. Las precipitaciones tienen una estacionalidad marcada a través del año produciéndose las mayores precipitaciones en los meses de abril y mayo, en los meses de octubre y noviembre se obtiene una temperatura promedio de 28°C.

---

<sup>5</sup> [http://www.aracataca-magdalena.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.aracataca-magdalena.gov.co/informacion_general.shtml)

### 5.1.2 Geología de la zona.<sup>6</sup>

Geológicamente el municipio está formado por estratos o mantos sedimentarios del período Terciario (3-65 millones de años) de la Era Cenozoica; consisten principalmente de estratos sucesivos de areniscas y arcillas esquistosas de colores amarillo, pardo, gris verdosa y azulado de las épocas del Oligoceno (26 a 38 millones de años) y Mioceno (12 a 26 millones de años). También se encuentran calizas calcáreas, areniscas calcáreas, gravilla, capas de carbón y calizas margosas del Plioceno (3 a 12 millones de años). Esta formación tiene un espesor significativo y se caracteriza por su fauna miocénica, restos vegetales, capas lignitosas fuertemente bituminosas.



Figura 5<sup>7</sup>. Hidrografía de la Ciénaga Grande de Santa Marta.

<sup>6</sup> [http://www.aracataca-magdalena.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.aracataca-magdalena.gov.co/informacion_general.shtml)

<sup>7</sup> Fuente: <https://www.elheraldo.co/infografias/infografia-hidrografia-de-la-cienaga-grande-de-santa-marta-278238>

La zona de estudio se encuentra sobre la formación geológica denominada Qal, el cual comprende depósitos aluviales y de llanuras aluviales, relacionadas con depósitos de ríos y corresponden a depósitos de arcillas, limos y arenas.

### **5.1.3 Geomorfología.<sup>8</sup>**

Las zonas en estudio comprenden la Planicie aluvial: Presenta característica similar al terreno plano en cuanto a las ligeras ondulaciones y pendiente; con ciertas diferencias con respecto a la formación, ya que, en el terreno plano, una vez formado puede o no haber acumulación de material posteriormente; mientras que en la planicie aluvial se deposita material siempre que se den las lluvias. Además, su posición fisiográfica es inferior a los valles, pues muchos de estos se amplían y mueren en la planicie aluvial en donde el agua continúa su recorrido por efecto de la pendiente de esta última.

La planicie aluvial se extiende, hacia el norte, sur, este y oeste del municipio. Se encuentran dentro de la planicie aluvial los corregimientos de Varela, Orihueca, Sevilla, Guacamayal, Soplador, Aracataca y Tucurinca.

## **5.2 Oferta y demanda hídrica.<sup>9</sup>**

El territorio del departamento se encuentra irrigado por 16 corrientes provenientes de la Sierra Nevada de Santa Marta y sus estribaciones, los costados suroccidental y occidental son bañados por el curso bajo del río Magdalena que ha conformado un paisaje inundable caracterizado por la presencia de humedales. El departamento cuenta con 12 sub-zonas hidrográficas que abarcan un área de 2.304.124,16 hectáreas. En el ámbito nacional, el

---

<sup>8</sup> [http://www.aracataca-magdalena.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.aracataca-magdalena.gov.co/informacion_general.shtml)

<sup>9</sup> [http://www.aracataca-magdalena.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.aracataca-magdalena.gov.co/informacion_general.shtml)



departamento del Magdalena está catalogado como el que mayor demanda de agua requiere para las actividades socioeconómicas, siendo el sector agrícola el que presenta la más alta participación con el 94%, en tanto que el uso doméstico (consumo, aseo) que hacen las personas del agua, apenas representa el 5% de la demanda y el uso pecuario el 1% (DNP, 2011 citado por CORPAMAG, 2013).

La cuenca del río Aracataca posee una extensión de 934.16 km<sup>2</sup>. La corriente principal es el río de Aracataca que nace en la vertiente occidental de la sierra nevada de Santa Marta, hacia donde vierten sus aguas una gran cantidad de ríos, caños arroyos y quebradas. Es la principal fuente de agua para el consumo humano en el municipio, del cual se abastece el acueducto municipal (Plan de Ordenamiento Territorial 2000 - 2009).

Según el Estudio Nacional del Agua (ENA), desarrollado por el IDEAM (2012), la oferta media de las fuentes hídricas que abastecen al municipio es de 1.904,32 mmc; en épocas de tiempo seco las fuentes ofrecen 1.590,59 mmc y la capacidad de regulación de las cuencas es baja. Anualmente se demanda 5.48 mmc, por lo que se infiere que no se presentan actualmente problemas de escases de este recurso (IGAC, 2012).

### **5.3 Edificaciones adyacentes del canal.<sup>10</sup>**

El Lugar de estudio del canal Tolima, se encuentra localizado en una zona urbana; las edificaciones aledañas presentan construcciones de un nivel del canal. Las estructuras básicamente son utilizadas como viviendas; en ninguna de ellas se ha notado agrietamientos, que puedan atribuirse al suelo. Sin embargo, la principal consecuencia negativa que presentan los habitantes de la zona, es que en épocas de invierno sufren las consecuencias de la lluvia por el

---

<sup>10</sup> [http://www.aracataca-magdalena.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.aracataca-magdalena.gov.co/informacion_general.shtml)

exceso de agua que pasa por el canal, presentándose inundaciones en sus construcciones. Por tal motivo, se hace indispensable realizar un estudio a fondo sobre el canal.



*Figura 6<sup>11</sup>. Canal Tolima Cerca de viviendas cercanas.*

La imagen anterior representa un punto, en el cual, sin presencia de lluvias la lámina de agua se encuentra cercana al hombro del canal, indicio de un posible desbordamiento ante mayores escenarios de caudal. No obstante en el canal se registran inundaciones debido a la

---

<sup>11</sup> Estudio hidrológico e hidráulico para el sector del cruce de la vía férrea con el canal ubicado en el p.k. 881+541 de la vía férrea Chiriguaná – santa marta en vía única en el municipio de Aracataca. Memorias de cálculo box culvert sobre el canal Tolima a la altura de la vía férrea Chiriguaná – Santa Marta- Informe Técnico AQUA ESTUDIOS Y DISEÑOS INGENIERÍA SAS.

insuficiente capacidad hidráulica de las secciones transversales, lo cual, fue verificado durante los recorridos de reconocimiento.

## **6. Aspectos generales de canales abiertos.<sup>12</sup>**

Un canal abierto es un conducto en el cual el agua fluye con una superficie libre. De acuerdo con su origen puede ser natural o artificial.

### **6.1 Canales naturales.**

Incluyen todos los cursos de agua que existen de manera natural en la tierra, los cuales, varían en tamaño desde pequeños arroyuelos en zonas montañosas, hasta quebradas, arroyos, ríos pequeños, grandes y estuarios de mareas.

### **6.2 Canales artificiales.**

Son aquellos contruidos o desarrollados mediante el esfuerzo humano, entre esos se encuentran de vegetación, de centrales hidroeléctricas y canaletas de irrigación, cunetas de drenaje, vertederos, canales de desborde, canales de madera, entre otros. También, canales de modelos contruidos en laboratorio con propósitos experimentales.

---

<sup>12</sup> Revisión de la capacidad y funcionamiento hidráulico de un canal mediante modelación numérica, EDUARDO CHAN GAXIOLA-MÉXICO, D.F. FEBRERO 2015

### 6.3 Canales revestidos.

El revestimiento de un canal satisface uno o varios de los objetivos que a continuación se mencionan:

- Permitir la conducción del agua, a costos adecuados y velocidades mayores, en áreas de excavación profunda o difícil corte.
- Disminuir la filtración y fugas de agua a través del cuerpo del canal y evitar el anegamiento u obras de drenaje costosas en terrenos adyacentes.
- Reducir y homogeneizar la rugosidad, con ello las dimensiones de la sección y los volúmenes de excavación.
- Asegurar la estabilidad de la sección hidráulica y proteger los taludes del intemperismo y de la acción del agua de lluvia.
- Evitar el crecimiento de vegetación y reducir la destrucción de los bordes por el paso de animales.
- Reducir los costos anuales de operación y mantenimiento. De acuerdo con lo anterior, un buen revestimiento debe ser impermeable, resistente a la erosión, de bajo costo de construcción y mantenimiento, durable a la acción de agentes atmosféricos, plantas y animales. En rigor, hasta los canales revestidos de concreto pueden ser erosionados por el flujo si se rebasa su resistencia a la erosión o se producen otros fenómenos más complejos como son la cavitación, que puede dislocar e incluso destruir el revestimiento. Sin embargo, los revestimientos de concreto amplían el intervalo de resistencia a la erosión y proporcionan un mejor desempeño hidráulico.

### **6.3.1 Tipos de revestimiento.**

Los revestimientos en un canal se construyen de varios tipos de material. El llamado de superficie dura puede ser a base de concreto simple, reforzado o lanzado a alta presión, de concreto asfáltico, de mampostería (piedra, ladrillo, bloques prefabricados, entre otros). En general, dichos materiales satisfacen todos los propósitos antes expuestos y ofrecen gran resistencia a la acción erosiva del agua. Otros revestimientos son a base de materiales granulares, como arcilla, tierra compactada o grava, que ofrecen menor resistencia a la erosión, pero superpuestos o no, sobre una membrana impermeable, disminuyen de modo importante las pérdidas de agua por infiltración.

#### **6.3.1.1 Velocidad mínima**

En general, para evitar el depósito de materiales en suspensión se recomienda diseñar un canal revestido con una velocidad mínima aceptable del orden de 0.4 a 1.0 m/s de acuerdo a la normatividad colombiana Ras-10.

#### **6.3.1.2 Velocidades máximas**

En revestimientos no armados, para evitar que los revestimientos se levanten por subpresión, se recomiendan velocidades menores de 2.5 m/s. Si el revestimiento cuenta con armadura la velocidad deberá limitarse en función de la erosión probable.

### **6.4 Canales no revestidos.**

El cuerpo de este tipo de canales y de los ríos se forma de materiales con partículas de forma, tamaño y propiedades diferentes, que varían desde grandes piedras a material coloidal. Según sea la intensidad del flujo, el material no siempre es capaz de resistir la fuerza de arrastre generada por el agua, que crece conforme aumenta la velocidad. Este aumento de velocidad, generalmente asociado a un incremento de pendiente, puede producir arrastre del material y su posterior depositación en las zonas donde disminuye la velocidad, lo que puede favorecer la

inundación de terrenos adyacentes por una disminución de su capacidad hidráulica de conducción. Cuando no hay revestimiento y el material que se excava es erosionable, las dimensiones de la sección se eligen para evitar la erosión y la sedimentación apreciable, es decir, se busca impedir el arrastre producido por el flujo en cualquier condición de operación para que el canal sea funcionalmente estable. Esto significa que es más importante que el canal mantenga su sección en equilibrio dentro de los intervalos de fluctuación del gasto, que cualquier otra condición de eficiencia hidráulica, económica o constructiva. Un canal no se reviste cuando el material del lecho reporta poca pérdida de agua, generalmente en suelos arcillosos, para los que pueden ser suficientes, una vez conformada la sección, la compactación de su plantilla y taludes.

#### **6.4.1 *Velocidad máxima en canales no revestidos.***

Para este tipo de canales, es básico determinar la sección con la cual es posible conducir el gasto de diseño, sin erosión del lecho, a una velocidad igual a la máxima permisible. Esta velocidad es incierta, ya que, los lechos en uso soportan, sin erosión, velocidades mayores a los recién construidos.

#### **6.5 Secciones transversales de un canal.**

Para sección de canal regular simple, los elementos geométricos pueden expresarse matemáticamente en términos de la profundidad de flujo y de otras dimensiones de la sección.

La forma más conocida y utilizada de la sección transversal de un canal de riego es la trapezoidal, como la que se muestra en la Figura 7.

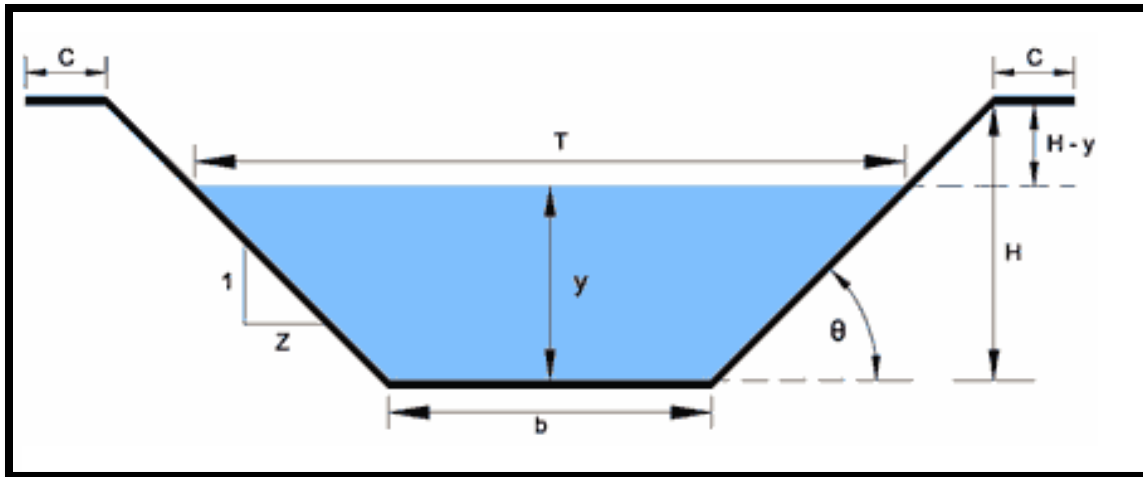


Figura 7<sup>13</sup>. Elementos Geométricos de la sección transversal de un canal.

- Y: Tirante de agua, altura que el agua adquiere en la sección transversal
- B: base del canal o ancho de solera
- T: espejo de agua o superficie libre de agua
- H: profundidad total del canal
- B.L.:  $H - y$  = borde libre
- C: ancho de corona
- $\Theta$ : ángulo de inclinación de las paredes laterales con la horizontal
- T: talud = 1, Horizontal: Vertical.

Es conveniente seleccionar un talud con estabilidad ligeramente superior a la del terreno natural (Sotelo, 2002), para que el canal resista el empuje del suelo.

<sup>13</sup> <http://www.ingenierocivilinfo.com/2010/02/elementos-geometricos-de-la-seccion.html>

## 6.6 Secciones típicas.






Sección	Area hidráulica A	Perímetro mojado P	Radio hidráulico R	Espejo de agua T
 Rectangular	$by$	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	$b$
 Trapezoidal	$(b+zy)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$
 Triangular	$zy^2$	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$
 Circular	$\frac{(\theta - \text{sen}\theta)D^2}{8}$	$\frac{\theta D}{2}$	$(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta})\frac{D}{4}$	$\frac{(\text{sen}\frac{\theta}{2})D}{2\sqrt{y(D-y)}}$
 Parabólica	$\frac{2}{3}Ty$	$T + \frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T+8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$

Figura 8<sup>14</sup>. Propiedades de los canales hidráulicos.

- **Tirante (y):** Es la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre, la profundidad de flujo de la sección es la profundidad de flujo perpendicular a la dirección de éste, o la altura de la sección del canal que contiene el agua.
- **El nivel:** Es la elevación o distancia vertical desde un nivel de referencia o “datum” hasta la superficie libre, no obstante, si el punto más bajo de la sección de canal se escoge como el nivel de referencia, el nivel es idéntico a la profundidad de flujo.
- **Ancho superficial (T):** Es el ancho de la sección del canal en la superficie libre.

<sup>14</sup> <http://ingenieriacivil.tutorialesaldia.com/mini-curso-de-diseno-de-canales-con-regimen-uniforme-parte-iv-calculo-de-la-altura-normal/>



- **El área mojada (A):** Es el área de la sección transversal del flujo perpendicular a la dirección de flujo.
- **El perímetro mojado (P):** Es la longitud de la línea de intersección de la superficie de canal mojada y de un plano transversal perpendicular a la dirección de flujo.
- **Radio hidráulico:** es la relación del área mojada con respecto a su perímetro mojado.
- **Profundidad hidráulica:** es la relación entre el área mojada y el ancho en la superficie.

### 6.7 Distribución de velocidades en una sección de canal.

Debido a la presencia de la superficie libre y a la fricción a lo largo de las paredes del canal, las velocidades en un canal no están uniformemente distribuidas en su sección. La máxima velocidad medida en canales normales a menudo ocurre por debajo de la superficie libre a una distancia de 0.05m a 0.025m de la profundidad.

A continuación, se muestran unas imágenes de un modelo general de la distribución de velocidades para varias secciones horizontales y verticales en un canal con sección rectangular y las curvas de igual velocidad de sección transversal, como también otras secciones.

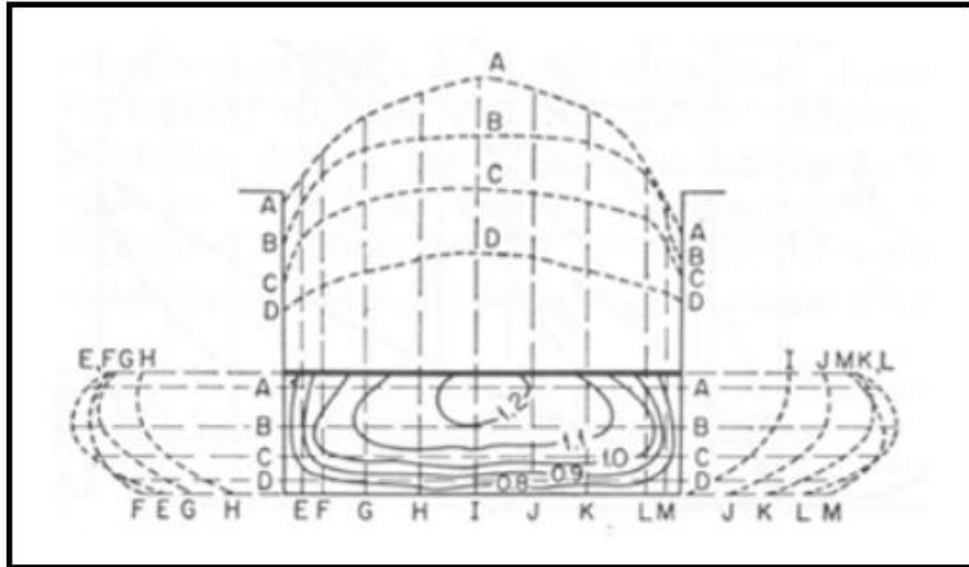


Figura 9<sup>15</sup>. Distribución de velocidad de un canal rectangular.

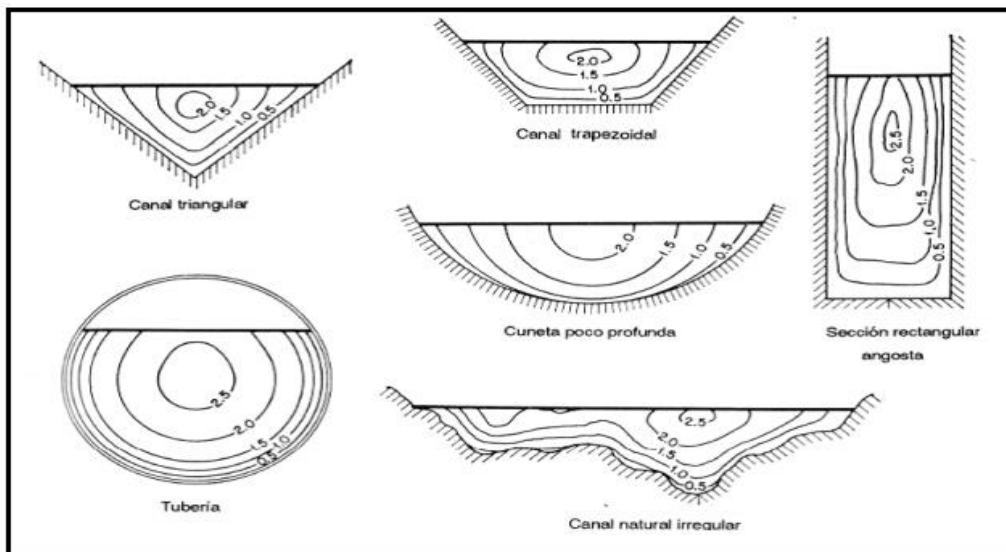


Figura 10<sup>16</sup>. Curvas comunes de igual velocidad en diferentes secciones de canal

<sup>15</sup> <sup>16</sup> <http://www.ingenierocivilinfo.com/2010/02/distribucion-de-velocidades-en-una.html>

### **6.7.1 *Velocidad mínima permisible.***

Esta es la menor velocidad que no permite el inicio de sedimentos y que impide el crecimiento de musgo o de plantas acuáticas. Este valor no es encontrado con facilidad, además de ser incierto. Para aguas que no tengan limos o para flujos previamente decantados, este factor es prácticamente despreciable, excepto por su efecto en el crecimiento de plantas. En general se recomiendan adoptar una velocidad media de 2 a 3 pies/s.

### **6.8 Pendientes de canal.**

La pendiente longitudinal del fondo de un canal está dada por la topografía o por la altura de energía requerida para el flujo de agua. La pendiente también depende en muchos casos del propósito del canal. Si, por ejemplo, los Canales para presas hidroeléctricas requieren un alto nivel en el punto de entrega, entonces para este caso, es recomendable una pendiente pequeña para mantener en el mínimo posible las pérdidas en elevación. Las pendientes laterales dependen principalmente de la clase de material. Se muestran las pendientes adecuadas con los materiales adecuados. Claro está, que esta tabla solo aplica a los canales no erosionables. “Otros factores a considerarse para la determinación de las pendientes laterales son el método de construcción, la condición de pérdidas por infiltración, cambios climáticos, el tamaño de canal, etc. En general, estas pendientes deben ser tan empinadas como sea factible y deben diseñarse de acuerdo con una alta eficiencia y estabilidad hidráulica”. (Chow, 1994, p.156).

## **6.9 Sección hidráulica óptima.**

La conductividad de una sección de canal se incrementa con el aumento en el radio hidráulico y la disminución en el perímetro mojado. Desde el punto de vista hidráulico, la sección de canal que tenga el menor perímetro mojado para un área determinada tiene la máxima conductividad, esta sección se le conoce como sección hidráulica óptima. Dentro de todas las secciones hidráulicas, la que tiene el menor perímetro mojado para un área determinada es el semicírculo, por lo cual, es la sección hidráulica más eficiente. Los elementos geométricos para seis secciones hidráulicas óptimas, no siempre son prácticas debido a dificultades de construcción y en el uso de material. Una sección de canal debe diseñarse para cumplir con una eficiencia hidráulica óptima, pero debe modificarse para tener en cuenta aspectos constructivos. Desde el punto de vista práctico, nótese que la sección hidráulica óptima es la sección que da el área mínima para un caudal determinado, pero no necesariamente la mínima excavación. Al respecto:

La sección con mínima excavación ocurre solo si el nivel del agua llega hasta el tope de las bancas. En los casos en los que la superficie del agua se encuentre por debajo del tope de las bancas, como ocurre a menudo, los canales más angostos que aquellos con la sección hidráulica óptima darán una excavación mínima. En resumen, los canales más anchos darán una excavación mínima. (Chow, 1994, p.158)

## **6.10 Clasificación de flujos.**

“Normalmente, en la ingeniería, la dinámica y cinemática de fluidos con modelos 1D, se estudia la siguiente clasificación de flujo para canales abiertos”. (Chow, 1994, p. 6)

- Flujo permanente
  - Flujo uniforme
  - Flujo variado
  - Flujo gradualmente variado
  - Flujo rápidamente variado
- 
- Flujo no permanente (flujo variado no permanente)
  - Flujo uniforme no permanente
  - Flujo no permanente
  - Flujo gradualmente variado no permanente.

#### ***6.10.1 Flujo rápidamente variado no permanente.***

Cuando se analizan con modelos 2D y 3D, la dinámica de fluidos, se debe estudiar una clasificación más extensa para su análisis y evaluación; más aún cuando en un problema se presentan sistemas compuestos, como son los de hidráulica de sistemas a presión y de superficie libre. A continuación, se presenta brevemente dicha clasificación:

#### ***6.10.2 Flujo laminar y flujo turbulento (efecto de la viscosidad).***

El flujo laminar se caracteriza cuando las partículas se mueven suavemente, modelando un flujo por “capas” (sin ocurrencias considerables de mezcla del fluido). El flujo turbulento se caracteriza cuando el movimiento de las partículas del fluido es caótico, modelando un flujo “enredado” (ocurrencia significativa de mezclado de fluido) (Bakker, 2012).

Para caracterizar este tipo de flujos, se tiene en cuenta los siguientes rangos con respecto al número de Reynolds:

$$Re = \frac{V \times L}{\mu} \quad \text{Ecuación 1}$$

Re = Número de Reynolds

V = Velocidad a flujo libre (velocidad media) [m/s]

L = Longitud característica [m]

$\mu$  = Viscosidad cinemática [m<sup>2</sup>/s]

En sistemas a presión (L = diámetro) (Cengel & Cimbala, 2006, p. 324):

- Flujo laminar para  $Re < 2000$
- Flujo en transición para  $2000 < Re < 4000$
- Flujo turbulento para  $Re > 4000$

En canales abiertos (L= Radio hidráulico) (Dingman, 2009, pág. 136) y (Chow, 1994, págs. 8-10):

- Flujo laminar para  $Re < 500$
- Flujo en transición para  $500 < Re < 2000$
- Flujo turbulento para  $Re > 2000$

Análisis de la capa límite (L= Longitud del canal) (Cengel & Cimbala, 2006, págs. 513,514), (Schlichting & Gersten, 2006, págs. 31 - 33) y (Schlichting H., 1979, p. 473):

Para una placa plana lisa con un flujo libre sin perturbaciones:

- Flujo laminar con  $Re$  crítico  $Re_{crit} = 3 \cdot 10^5$
- Flujo en transición  $3.5 \cdot 10^5 < Re_x < 3 \cdot 10^6$
- Flujo turbulento para  $Re_x > 3 \cdot 10^6$

Para una placa plana afectada por factores como la rugosidad de la superficie, las perturbaciones de flujo libre, el ruido acústico, el hecho que el flujo no es estacionario, las vibraciones y la curvatura de la superficie sólida:

- Flujo laminar con  $Re$  crítico  $< 5 \cdot 10^5$
- Flujo turbulento para  $Re > 5 \cdot 10^5$

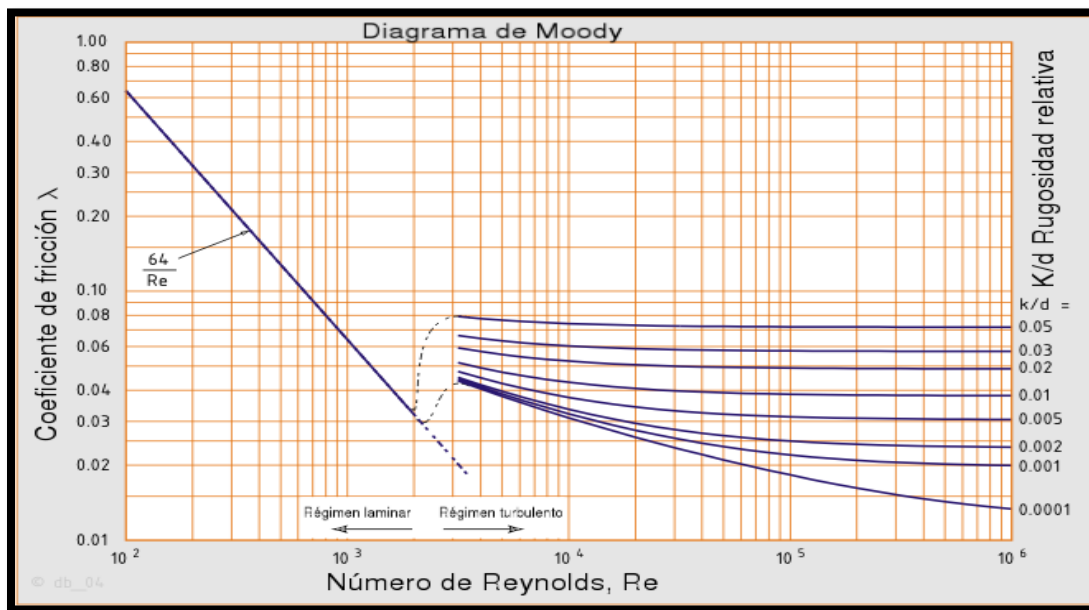


Figura 11<sup>17</sup>. Diagrama de Moody.

<sup>17</sup>Revisión de la capacidad y funcionamiento hidráulico de un canal mediante modelación numérica, EDUARDO CHAN GAXIOLA-MÉXICO, D.F. FEBRERO 2015

El diagrama muestra el factor de fricción en función del número de Reynolds, para una familia de curvas correspondientes a diferentes valores de rugosidad relativa.

Por otra parte, antes de proponer la sección hidráulica del canal, se debe conocer el servicio que este tendrá. Es importante debido a que la sección nos da una idea de cómo es el funcionamiento del canal desde el punto de vista hidráulico, por ejemplo, si se usara para regar, es recomendable una sección trapezoidal; si se usara como desagüe de una vía es recomendable una sección triangular, o si se usara para evacuar el agua de un puente podría usarse una sección circular o rectangular.

### ***6.10.3 Flujo sub-crítico, crítico y supercrítico (efecto de la gravedad).***

Según Chow, (1994) el efecto de la gravedad sobre el estado del flujo se presenta por la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales (p.13). Esta relación está dada por el número de Froude, definido como:

$$F = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde  $V$  es la velocidad media del flujo en [m/s],  $g$  es la aceleración de la gravedad en [m/s<sup>2</sup>] y  $L$  es una longitud característica en [m] o profundidad hidráulica para canales abiertos.

Para clasificar el flujo según el número de Froude, se tienen:

- Si  $Fr < 1$ ; entonces se tiene un flujo Sub-crítico.
- Si  $Fr = 1$ ; entonces se tiene un flujo crítico.
- Si  $Fr > 1$ ; entonces se tiene un flujo supercrítico (según aumente la velocidad se clasifica como rápido, ultra-rápido y torrencial).



### **6.11 Resalto hidráulico.**

El resalto hidráulico es el ascenso brusco del nivel del agua que se presenta en un canal abierto a consecuencia del retardo que sufre una corriente de agua que fluye a elevada velocidad. Este fenómeno presenta un estado de fuerzas en equilibrio, en el que tiene lugar un cambio violento del régimen de flujo, de supercrítico a sub-crítico. Las características del resalto hidráulico han sido aprovechadas para reducir las velocidades de flujo en canales a valores que permitan el escurrimiento sin ocasionar tensiones de corte superiores a los límites permitidos por los materiales que componen el perímetro mojado. El lugar geométrico en que se presenta el resalto, se denomina colchón hidráulico.

### **6.12 Flujo permanente y flujo no permanente.**

Las propiedades de un flujo permanente en cualquier punto dado en el espacio son constantes en el tiempo. Mientras las propiedades de flujo no permanente en cualquier punto dado en el espacio cambian con el tiempo (Bakker, 2012).

#### ***6.12.1 Flujo permanente.***

En diseño básico de canales, considerando flujo uniforme, se asume que las fuerzas gravitacionales están en equilibrio con las fuerzas de fricción, lo cual implica que las pendientes de la superficie libre del agua y del fondo del canal son paralelas, para un gasto constante. Esta condición, más teórica que real, se podría casi establecer en canales prismáticos de gran longitud con características geométricas, hidráulicas y físicas uniformes, lo cual, en la práctica no es común que ocurra en un canal de riego; esto es debido a que a lo largo de las redes y líneas de canales existen cambios en la geometría, en la rugosidad, en el caudal, así como una serie de estructuras de control, paso y derivación que se pueden considerar como discontinuidades

hidráulicas como lo son: diques, entradas de agua, extracciones, represas, vertedores, sifones, puentes canal, desfuegos, caídas rápidas que provocan aceleraciones locales y cambios en las características hidráulicas del flujo que vuelven, imposibilita el establecimiento del régimen uniforme.

Las fórmulas de flujo uniforme se pueden expresar en la siguiente forma general:

$$V = f R^x S^y \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde  $V$  es la velocidad media;  $R$  es el radio hidráulico;  $S$  es la pendiente de la energía,  $x$  e  $y$  son exponentes; y  $f$  es un factor de resistencia al flujo que depende de rugosidad del material de las paredes del canal, turbulencia, temperatura del agua, y la viscosidad.

En la fórmula de resistencia de flujo cuando se adoptan los valores de  $x=y=1/2$ ,  $f=C$ , entonces la ecuación 3, se escribe de la forma siguiente:

$$V = C \sqrt{RS} \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde:

$V$ : Velocidad media en pies/s

$R$ : radio hidráulico en pies

$S$ : pendiente de la línea de energía

$C$ : Factor de resistencia al flujo, conocido como  $C$  de Chezy

La ecuación 3 es conocida como ecuación de Chezy, por otra parte, para  $x=2/3$ ,  $y=1/2$ ,  $f=1/n$ , se tiene la siguiente expresión

$$V=1/n*R^{2/3}*S^{1/2} \quad \text{Ecuación 5.}$$

Expresión conocida como de Chezy-Manning o simplemente Manning, en este caso  $n$ , es el coeficiente de Chezy-Manning, la relación entre los coeficientes de Chezy y de Manning se expresan de la forma siguiente:

$$C=1/n*R^{1/6} \quad \text{Ecuación 6.}$$

Principio de conservación de masa para flujo permanente.

Por otra parte, en flujo permanente y de acuerdo con la ecuación de continuidad, el gasto se mantiene constante en todo el canal, y se satisface la relación;

$$Q=AV \quad \text{Ecuación 7.}$$

Donde  $A$ , es el área hidráulica de la sección transversal del canal.

#### 6.12.1.1 *Ecuación de la energía o de Bernoulli*

La forma para evaluar la variación entre la energía potencial de un flujo a superficie libre y la cinética, se expresa por la ecuación de la energía. En este estado se puede adicionar un término para englobar las pérdidas por rozamiento, efectos de cambios laterales abruptos (por ejemplo, la entrada a un sifón o una laguna lateral) y los efectos de turbulencia.

En complemento al recurrir a la ecuación de la energía, se tiene que la energía total por unidad de peso que posee el agua en su movimiento, medida en cualquier punto de intersección

de alguna línea de corriente con el plano de la sección de un canal al ser aplicada entre dos secciones de un canal, se expresa de la siguiente forma:

$$z_1 + y_1 \cos \theta_1 + \alpha_1 V_1^2 / 2g = z_2 + y_2 \cos \theta_2 + \alpha_2 V_2^2 / 2g + \Delta h_r \quad \text{Ecuación 8.}$$

Donde  $\Delta h_r$  es la pérdida de energía entre las dos secciones e igual a la caída de nivel entre las mismas, o sea, para fines prácticos igual al producto de la pendiente de fricción por la distancia que la separa.

En la ecuación 8 para flujo uniforme se tiene que:

$$S = \frac{Z_2 - Z_1}{L} \quad \text{Ecuación 9.}$$

$$d = (L^2 - (Z_{1-2} - Z_{2-2})^2)^{0.5} / L \quad \text{Ecuación 10.}$$

Donde  $d$  es el tirante, entonces la ley de cortante (Ecuación 3) se puede expresar como:

$$h_f = \left[ \frac{V_n}{R h^{2/3}} \right] 2L \quad \text{Ecuación 11.}$$

Donde  $L$  es la longitud entre las secciones consideradas.

#### 6.12.1.2 Ecuación de Manning

Esta ecuación que en un principio fue dada en forma complicada por Manning y luego simplificada por otros, quedando dicha ecuación de la siguiente manera:

$$V = \frac{1.49}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad \text{Ecuación 12.}$$

Donde:

$V$ : velocidad media en pies/s.

R: radio hidráulico en pies.

S: pendiente de la línea de energía.

n: es el coeficiente de rugosidad de Manning.

Esta ecuación fue deducida a partir de siete ecuaciones diferentes, basada en datos experimentales de Bazin y además verificada mediante 17 observaciones, ya que, esta ecuación da resultados satisfactorios en aplicaciones prácticas y debido a su simplicidad, es la más utilizada en la práctica de cálculos de flujos de canales abiertos.

Como clave para la determinación correcta del factor de rugosidad de Manning se tiene que estudiar cuatro enfoques generales, estos son:

- Entender los factores que afectan el valor de “n”, para conocer el problema y disminuir el rasgo de incertidumbre.
- Consultar una tabla de valores comunes “n” para canales de diferentes tipos.
- Examinar y familiarizarse con canales comunes y sus coeficientes de rugosidad.
- Determinar “n” mediante un proceso analítico que se basa en la distribución de la velocidad teórica de la sección transversal y en los datos de medición de velocidad o rugosidad (Cálculo de Resistencia del factor de Chezy, Hidráulica de canales, citado en Ven Te Chow, p. 92-96).

#### 6.12.1.2.1 *Coeficiente n de Manning.*

La precisión en la selección del coeficiente n de Manning es de gran relevancia en el cálculo del gasto de diseño del canal. Al implementar un valor más grande como factor de resistencia al flujo, tanto la velocidad como el gasto resulta mayor, por ende, el coeficiente n es

menor, cuando el valor del factor de resistencia ( $f$ ) es pequeño, tanto la velocidad como el gasto resulta menor, entonces, el coeficiente  $n$  es grande. Así mismo, para su determinación se debe contar con la mayor información disponible del canal en estudio.

#### 6.12.1.2.2 *Factores que afectan el coeficiente de rugosidad de Manning.*

- “R” rugosidad artificial: Ésta se representa por el tamaño y la forma de los granos del material que forman el perímetro mojado y provocan un efecto retardado del flujo; granos finos darán un valor pequeño de  $n$ .
- Vegetación: la vegetación puede considerarse como una clase de rugosidad superficial, además, ésta puede reducir la capacidad del canal.
- Irregularidad del canal: esto incluye en el perímetro mojado y variaciones en la sección transversal. En canales naturales estas irregularidades son producidas por presencia de arena, ondas de arena; también hay cambios abruptos en las secciones pequeñas y grandes, es necesario un  $n$  grande. Si el cambio de sección transversal fuera gradual no hay efectos apreciables en  $n$ .
- Alineamiento del canal: Son curvas suaves con radios grandes que producen valores de “ $n$ ” relativamente bajos, pero en tantos sean curvas bruscas, su  $n$  aumentará.
- Sedimentación y socavación: la sedimentación puede cambiar un canal irregular en un canal relativamente uniforme y disminuir el  $n$ , en tanto la socavación hace lo contrario e incrementa el “ $n$ ”. Sin embargo, el efecto dominante de la socavación dependerá de la naturaleza del material depositado. La socavación dependerá del material que conforme el perímetro mojado. Es de anotar que el efecto de la socavación no es importante siempre y

cuando la erosión en el lecho del canal causado por velocidades altas progrese igual e uniformemente.

- Obstrucción: la presencia de obstrucciones de troncos, pilas de puente y estructuras similares tienden a incrementar en “n”, la magnitud de este aumento dependerá de la naturaleza de las obstrucciones, de su tamaño, forma, número y distribución.
- Tamaño y forma del canal: un incremento en el radio hidráulico puede aumentar y disminuir el “n”.
- Nivel y caudal: en la mayor parte de las corrientes el valor de n disminuye con el aumento en el nivel y el caudal. Si el lecho y las bancas de un canal son igualmente suaves, regulares y la pendiente del fondo es uniforme, entonces el valor de n permanece constante para el cálculo de flujo. Esto ocurre principalmente en los canales artificiales. Cuando hay planicies de inundación, “n” depende de la cubierta vegetal.
- Cambio estacional: esto se toma en cuenta cuando el canal tiene un crecimiento estacional de plantas acuáticas, hierbas, maleza, entre otros. El valor de “n” puede aumentar en estación de crecimiento y disminuir en la estación inactiva. Además, este cambio puede afectar otros factores ya antes mencionado.
- Material en suspensión y carga del lecho: el material en suspensión y la carga del lecho, ya sea en movimiento o no, consumirá energía y causará una pérdida de altura e incrementará la rugosidad aparente del canal.

Tipo y descripción del canal	Mínimo	Normal	Máximo
<b>Cemento:</b>			
1. Superficie lisa.	0.010	0.011	0.013
2. En mortero.	0.011	0.013	0.015
<b>Concreto:</b>			
1. Acabado con llana metálica.	0.011	0.013	0.015
2. Acabado con llana de madera.	0.013	0.015	0.016
3. Acabado con grava en el fondo.	0.015	0.017	0.020
4. Sin acabado.	0.014	0.017	0.020
<b>Fondo de concreto acabado con llana, bordos de:</b>			
1. Piedra acomodada sobre mortero.	0.015	0.017	0.020
2. Mampostería de piedra mal acomodada sobre mortero.	0.017	0.020	0.024
3. Mampostería de piedra pequeña, cementada y revocada.	0.016	0.020	0.024
4. Mampostería d piedra pequeña cementada.	0.020	0.025	0.030
5. Mampostería seca de piedra pequeña.	0.020	0.030	0.035
<b>Fondo de grava con taludes de:</b>			
1. Concreto colado en moldes.	0.017	0.020	0.025
2. Piedra mal acomodada en mortero.	0.020	0.023	0.026
3. Mampostería seca de piedra pequeña.	0.023	0.033	0.036
<b>Mampostería de piedra:</b>			
1. Pequeña, cementada.	0.017	0.025	0.030
2. Pequeña, seca.	0.023	0.032	0.035
<b>Suelo- cemento.</b>	0.015	0.016	0.017

Figura 12<sup>18</sup>. Valores del coeficiente  $n$  en la ecuación de Manning. Canales recubiertos o revestidos.

Valores del coeficiente  $n$  en la ecuación de Manning. Canales excavados o dragados en diferentes tipos de suelo (Chow, 1994).

<sup>18</sup> Ven te Chow, David R. Maidment, Larry W .Mays; traducción Juan G. Saldarriaga (1994) Hidrología aplicada. Santa Fe de Bogota, Colombia. McGraw-Hill



Tipo y descripción del canal	Mínimo	Normal	Máximo
<b>Tierra, recto y uniforme:</b>			
1. Limpio, recientemente terminado.	0.016	0.018	0.020
2. Limpio, después de intemperizado.	0.018	0.022	0.025
3. Grava, sección uniforme y limpia.	0.022	0.025	0.030
4. Con poco pasto y poca hierba.	0.022	0.027	0.033
<b>Excavado o dragado en línea recta:</b>			
1. Sin vegetación.	0.025	0.028	0.033
2. Pocos arbustos en los bordos.	0.035	0.050	0.060
<b>Cortado en roca:</b>			
1. Liso y uniforme.	0.025	0.035	0.040
2. Con salientes agudas e irregulares.	0.035	0.040	0.050

Figura 13<sup>19</sup>. Valores del coeficiente  $n$  en la ecuación de Manning. Canales recubiertos o revestidos.

Para el caso de canal con rugosidad compuesta se puede utilizar la siguiente expresión, Cowan; referenciado por Chow (1994): “ $n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m_5$ ” - Ecuación 13 (p. 104).

Donde  $n_0$  es el coeficiente base para un canal recto, uniforme y regular, con el material del sitio y libre de vegetación, obstrucciones, cambios de forma y alineación. El coeficiente  $n_1$  considera el efecto de las irregularidades del canal,  $n_2$  las variaciones en forma y tamaño de la sección,  $n_3$  las obstrucciones del área hidráulica,  $n_4$  la densidad, tipo de vegetación en márgenes y fondo, y las características del flujo, y  $m_5$  es un factor de corrección por efecto de las sinuosidades o curvas que muestra el curso del río o canal. Los factores mencionados se estiman por la importancia de su efecto crítico y deben evaluarse de manera independiente. Factores correctivos de  $n$  (Ec.13), según el (Soil Conservation Service, 1963).

<sup>19</sup> Ven te Chow, David R. Maidment, Larry W .Mays; traducción Juan G. Saldarriaga (1994) Hidrología aplicada. Santa Fe de Bogota, Colombia. McGraw-Hill

Condiciones del cauce o canal	Valor del coeficiente
<b>1. Características del canal:</b>	$n_0$
a) En tierra.	0.02
b) Cortados en roca.	0.025
c) En grava fina.	0.024
d) En grava gruesa.	0.028
<b>2. Grado de irregularidad:</b>	$n_1$
a) Fronteras lisas. Lo mejor que se obtiene para los materiales que se utilizan.	0
b) Irregularidades menores. Por ejemplo, canal bien dragado o excavado, o ligeramente socavado en las orillas, o canales de drenaje.	0.005
<b>3. Variaciones de la sección transversal en forma y tamaño:</b>	$n_2$
a) Graduales.	0
b) Secciones grandes y pequeñas alternadas ocasionalmente. Se alternan secciones amplias y estrechas por cambio de forma o del ancho de la plantilla, causando desviación ocasional desde el cauce principal a ambos lados.	0.005
c) Secciones grandes y pequeñas alternadas frecuentemente o bien cambios de forma que causan desviación ocasional desde el cauce principal a ambos lados.	0.01 a 0.015
<b>4. Obstrucciones al área hidráulica debidas a grandes rocas troncos, depósitos de desperdicios o de rocas (conviene hacer mediciones directas en tramos representativos):</b>	$n_3$
a) Sin obstrucción.	0
b) Menores	0.01 a 0.015
c) Apreciables	0.02 a 0.03
d) Severas	0.04 a 0.06
<b>5. Cantidad y tipo de vegetación (conviene hacer mediciones directas):</b>	$n_4$
a) Poca densidad. Márgenes cubiertos de pasto o hierbas. Tirante 2 a 3 veces mayor la altura de la vegetación.	0.005 a 0.1
<b>6. Grado de sinuosidad. Se define como el cociente <math>s</math> de la distancia entre dos puntos siguiendo el eje del cauce y la distancia en la línea recta entre los mismos puntos. Puede ser:</b>	$m_5$
a) Menor, si $s < 1.2$ ;	1.00
b) Apreciable, si $1.2 \leq s < 1.5$ ;	1.15
c) Severo, si $s \geq 1.5$	1.30

Figura 14<sup>20</sup>. Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad mediante la ecuación de Cowan.

<sup>20</sup> Ven te Chow, David R. Maidment, Larry W. Mays; traducción Juan G. Saldarriaga (1994) Hidrología aplicada. Santa Fe de Bogotá, Colombia. McGraw-Hill

## **7. Obras de control en canales de riego.<sup>21</sup>**

Las estructuras de control que se contemplan en el diseño integral de un distrito de riego, son las estructuras de protección, distribución y cruce (UAS, 2011).

### **7.1 Estructuras de protección.**

Las estructuras de protección son colocadas en los sistemas de canales, para evitar problemas ocasionados por altas velocidades, desbordamiento de la sección por aumento de tirante. Las principales estructuras para estos problemas son las rápidas y caídas.

### **7.2 Estructuras de cruce.**

Las estructuras de cruce se necesitan construir, cuando se tienen obstáculos en el desarrollo de un canal, como un arroyo, río, camino, depresión, elevación. Las principales estructuras son el sifón, puente canal y alcantarilla.

## **8. Software.**

### **8.1 HEC RAS.<sup>22</sup>**

#### ***8.1.1 Descripción del programa.***

El HEC-RAS es una herramienta computacional desarrollado por el Hydrologic Engineering Center, U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERING, permite el cálculo en régimen permanente de la superficie libre del agua en cauces naturales y canales, tanto en régimen

---

<sup>21</sup> Revisión de la capacidad y funcionamiento hidráulico de un canal mediante modelación numérica, EDUARDO CHAN GAXIOLA-MÉXICO, D.F. FEBRERO 2015

<sup>22</sup> Martínez M. Eduardo, "Hidráulica Fluvial" principios y prácticas. 1era edición, editorial BELLISCO. ANEJO D, año 2001

subcrítico como supercrítico. Es utilizable en el cálculo de tramos con un solo remanso, así como con varios remansos dentro del mismo cálculo.

El programa permite modelizar tanto secciones transversales de cauces naturales como la curvatura en la definición en planta, definiendo distancia entre secciones en el centro y en ambos laterales. Así mismo permite la modelización de estructuras hidráulicas como puentes, diques, etc.

Los resultados calculados incluyen además de la definición de la superficie libre, las velocidades y energías en cada una de las secciones, así como otros datos de interés como pendiente de energía, etc.

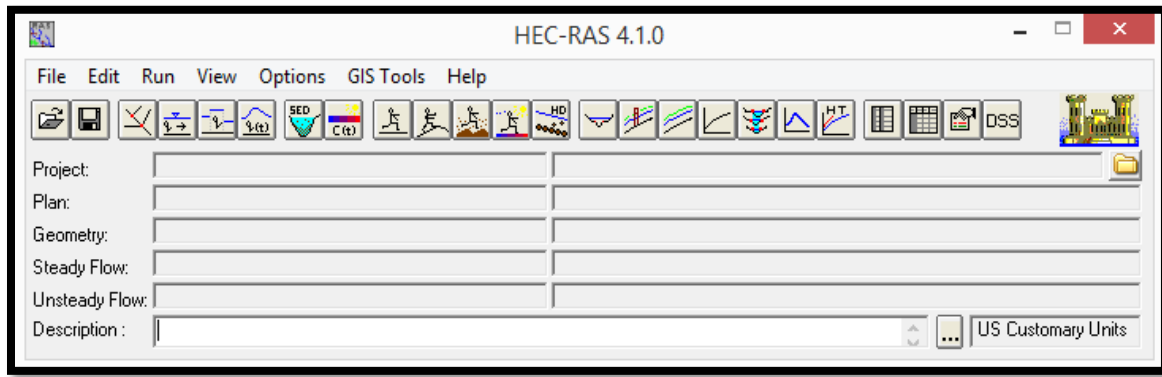
La metodología utilizada es similar a la del anterior HEC-2 WATER SURFACE PROFILES, también desarrollado por el HEC (Hidrologic Engineering Center), existiendo un módulo de aceptación de los datos desde el formato HEC-2.

### **8.1.2 *Entrada de datos***

Los datos necesarios se pueden introducir bien directamente a través de pantallas interactivas o bien desde un fichero de HEC-2 o con cualquiera de las utilidades de Windows.

El comienzo del trabajo se realiza desde una pantalla inicial interactiva, figura 15, presentando las habituales opciones de Fichero, Edición, Simulación, Visualización, Opciones, Ayuda.

Todas las actividades realizadas con el programa, son interactivas actualizando de manera simultánea los distintos ficheros.



*Figura 15.* Pantalla principal del programa HEC-RAS

Los distintos proyectos están estructurados, en proyecto, plan, geometría y caudal, permitiendo una jerarquización y ordenación de los distintos cálculos.

Los datos necesarios son de tres tipos:

- Datos Geométricos, que definen el contorno de río.
- Datos hidráulicos, fundamentalmente, el caudal, la rugosidad y la evaluación de las pérdidas localizadas.
- Datos de contorno o condiciones de borde.

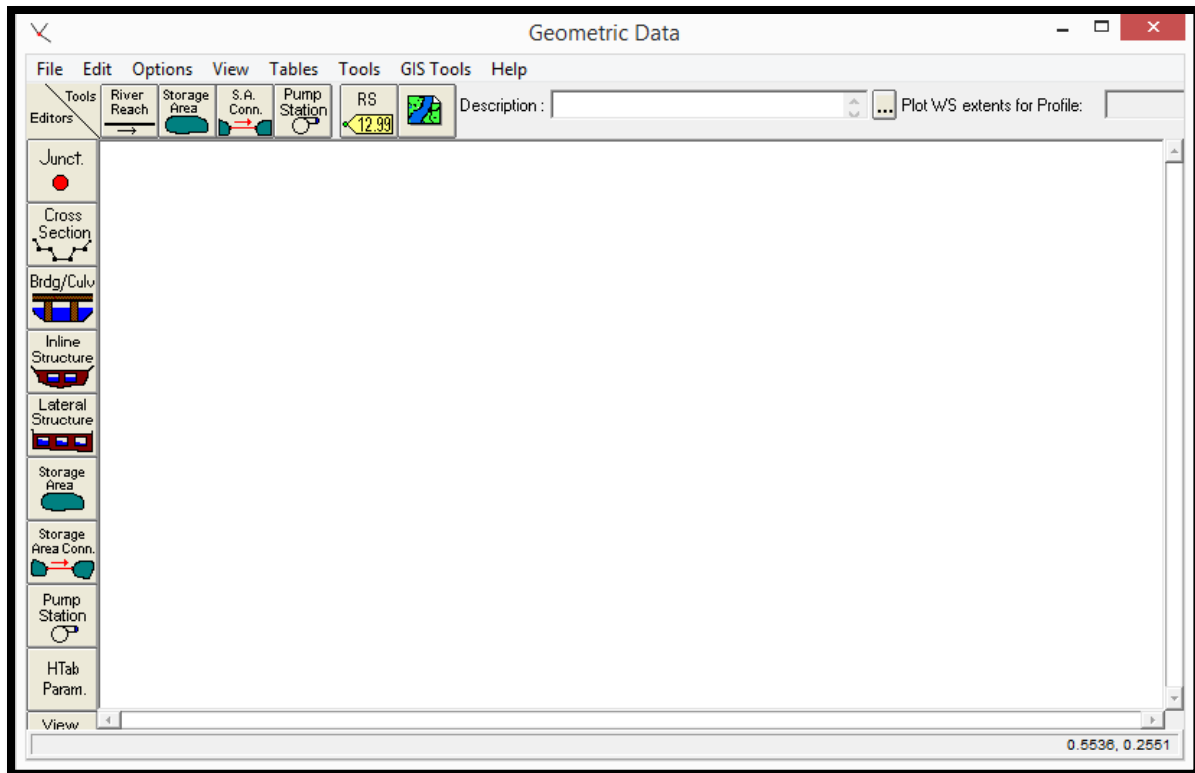


Figura 16. Ventana de datos geométricos

### 8.1.2.1 Datos geométricos

Los datos geométricos se introducen por medio de la ventana de sección transversal (figura 17) y son:

- Datos geométricos de la sección, distancia y cota (la cota está referenciada en todas las secciones al mismo plano de referencia).
- Distancia a la sección anterior (en la bancada izquierda “LOB”, en el cauce central, “Channel” y en la bancada derecha “ROB”).
- Valor de la “n” de Manning
- Delimitación en distancia del cauce central
- Coeficientes de contracción y de expansión.

The screenshot shows the 'Cross Section Data' window. It includes a menu bar (Exit, Edit, Options, Plot, Help) and a toolbar with buttons for 'Apply Data', 'Plot Options', 'Keep Prev XS Plots', and 'Clear Prev'. Below the toolbar are input fields for 'River:', 'Reach:', and 'River Sta.:'. A 'Description' field is also present. The main area is divided into several sections: 'Cross Section Coordinates' with a table for Station and Elevation; 'Downstream Reach Lengths' with fields for LOB, Channel, and ROB; 'Manning's n Values' with fields for LOB, Channel, and ROB; 'Main Channel Bank Stations' with fields for Left Bank and Right Bank; and 'Cont\Exp Coefficient (Steady Flow)' with fields for Contraction and Expansion. A large plot area on the right displays 'No Data for Plot'. At the bottom, there is a status bar that says 'Edit Station Elevation Data (m)'.

Figura 17. Ventana de datos geométricos para secciones transversales

8.1.3 Condiciones hidráulicas.

Las condiciones hidráulicas, sección crítica, nivel conocido o pendiente conocida se introducen con la ventana de la figura 18.

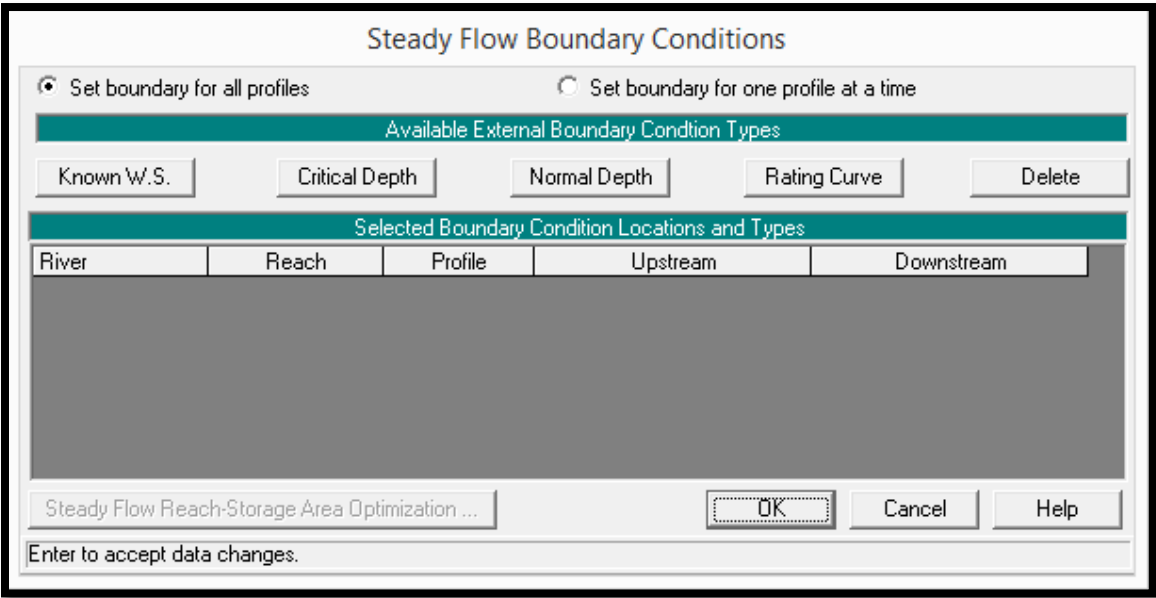


Figura 18. Ventana con datos hidraulicos (condiciones de contorno)

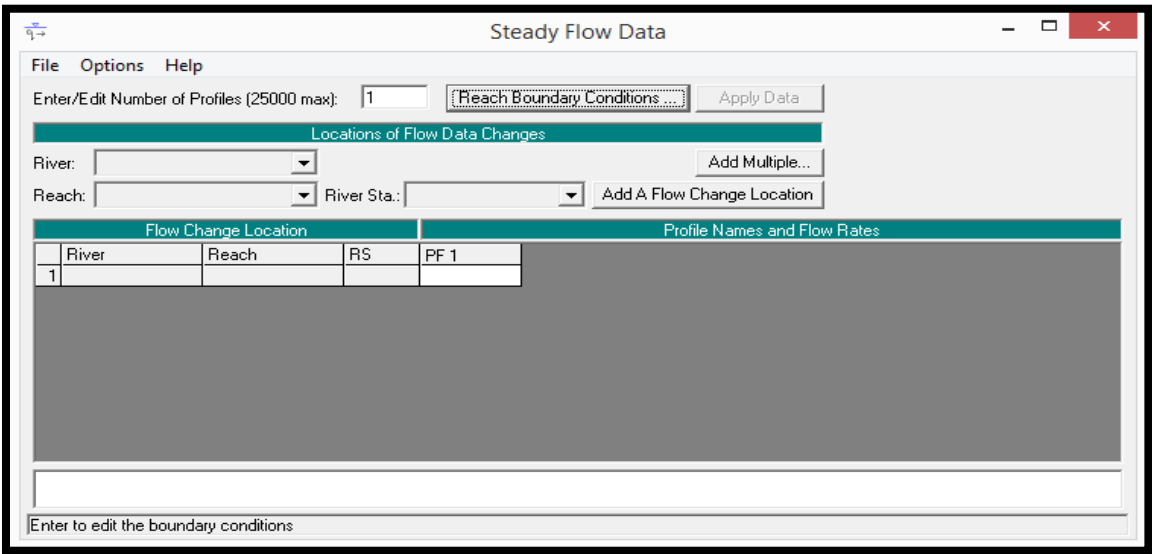


Figura 19. Ventana con datos hidraulicos (caudales)



## 9. Estado del arte.

En la actualidad el canal Tolima presenta “PROBLEMAS OPERATIVOS EN EL MANEJO DEL AGUA EN EL DISTRITO DE RIEGO”, por lo tanto, la eficiencia en la conducción de agua en las redes de distribución del distrito de riego ha sido relativamente baja. Esto se debe a que gran parte del canal no está revestido y las estructuras de control no son adecuadas para mantener niveles constantes durante la distribución del agua; siendo una deficiencia en la obra de infraestructura que genera pérdidas operativas en la red. Por otra parte, cuando el personal gubernamental estaba a cargo de la operación de los distritos de riego en la zona, existían las denominadas "pérdidas administrativas", es decir, los usuarios que se encuentran beneficiados en los distritos de riego no cancelan el pago por el servicio prestado, reportándose como perdidas en la conducción del sistema.

Según Tucci (1998), la optimización es la búsqueda del valor de una variable o de  $n$  variables, que proporcionen el mejor resultado para una función objetivo obedeciendo ciertas restricciones. Las técnicas iterativas de optimización son utilizadas para ajustar los parámetros de los modelos hidráulicos porque normalmente la función objetivo resultante del uso de estos modelos es implícita, es decir, los parámetros a ser optimizados no forman parte explícitamente de la función objetivo.

Según Estrela (1988), la calibración se utiliza para dar valores numéricos a aquellos parámetros sobre los que se dispone de pocos o ningún dato directo, siendo una etapa en la que se busca que el modelo reproduzca con la mayor fidelidad el funcionamiento del sistema observado.

Según Schwar (1996), el objetivo de la calibración consiste en minimizar la diferencia entre las respuestas reales del sistema y las respuestas simuladas por el modelo empleado.

## **MODELO HIDROLÓGICO- HIDRÁULICO PARA EVALUAR UN SISTEMA DE DRENAJE URBANO EN ZONAS PLANAS.**

**AUTOR: LUIS ALEJANDRO SANCHEZ**

En este trabajo se empleó el Modelo Storm Water Management Model (SWMM) para evaluar el Drenaje Pluvial existente en la Avenida Ramón Antonio Medina, una de las principales vías de la ciudad. Se realizó el análisis hidrológico e hidráulico del funcionamiento del drenaje existente, para resolver las inundaciones en las adyacencias de la vía, producto de procesos urbanísticos como el cambio de uso del suelo. Se propuso una solución basada en incorporar nuevas captaciones como 11 sumideros de ventana ubicados a lo largo de la vía, 4 sumideros de reja en calzada ubicados en 3 de los sectores adyacentes y modificación en el diámetro del colector principal.

A pesar de que en La Ciudad de Coro no se dispone de datos de campo que permitan una adecuada calibración y validación de estos modelos, un análisis comparativo de los gastos simulados en cada subcuenca, evidenció cierta concordancia entre el escurrimiento simulado por el modelo SWMM y las observaciones realizadas durante eventos lluviosos en las zonas críticas de la vía. No obstante, se propone estudiar alternativas que permitan instrumentalizar alguna de las subcuencas urbanas a fin de calibrar el Modelo de Gestión de Aguas Pluviales (SWMM), y validar su implementación en zonas con características topográficas similares a las de Coro. (Sánchez, 2009)

## **CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWMM EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE ALTA PENDIENTE EN COSTA RICA**

**AUTOR: MAIKEL MENDEZ MORALES**

Se aplicó el modelo hidrológico SWMM a un caso de estudio que incluyó el análisis de dos cuencas hidrológicas en el área urbana de la ciudad de Cartago, Costa Rica. Para la optimización de parámetros, calibración y análisis de sensibilidad de SWMM, se utilizó la suite de calibración y optimización paramétrica PEST, la cual se fundamenta en los algoritmos de Gauss-Marquardt-Levenberg (GML).

En el proceso de calibración con PEST se utilizaron 10 eventos secuenciales de tormenta registrados por tres estaciones meteorológicas durante la estación lluviosa del año 2011. La evolución de los parámetros, junto con su sensibilidad relativa, fue analizada para cada evento seleccionado haciendo uso de los hidrogramas observados. El análisis de dichos eventos indica que tanto los parámetros como las sensibilidades relativas y, por ende, su importancia, cambian en relación con la tipología de cada tormenta y con el régimen de precipitación del año hidrológico, lo cual a su vez indica que no existe un único set óptimo de parámetros que se adapte satisfactoriamente a todas las condiciones.

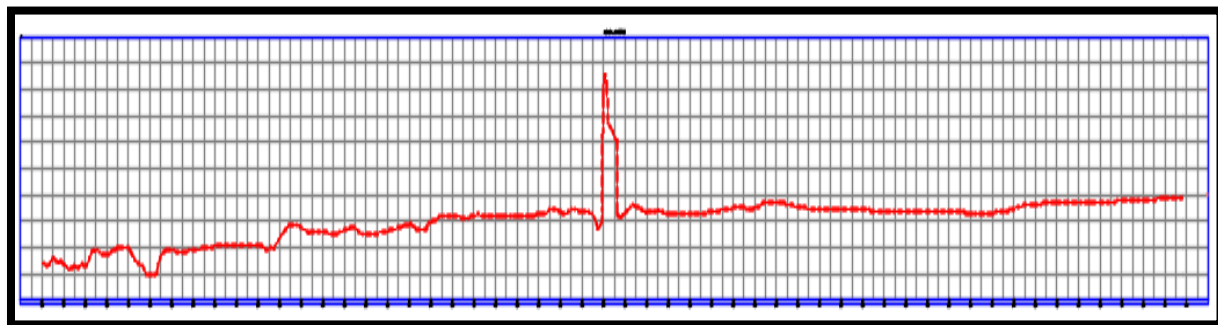
Los coeficientes de rugosidad de Manning para el flujo superficial sobre el área impermeable ( $n_{imp}$ ), el flujo superficial sobre el área permeable ( $n_{per}$ ) y el tránsito hidráulico ( $n_{cha}$ ) resultaron los parámetros más sensitivos de todos, siendo estos últimos de carácter totalitario. El comportamiento de estos parámetros es parcialmente dependiente de la intensidad y volumen total de precipitación en relación con los usos y coberturas que dominan el espacio de cada cuenca analizada. Su comportamiento también sugiere que existe una profunda dependencia

con respecto al estado de humedad antecedente del suelo y los estados de flujo hidráulico, tanto a nivel de superficie como de tránsito hidráulico (Mendez, 2012).

## 10. Desarrollo del trabajo

### 10.1 Topografía del canal<sup>23</sup>

El terreno posee una configuración topográfica relativamente plana, la cual, se toma como representativa para el terreno en estudio. Se presume que cualquier indicio que arroje un diferencial de cota en algunos puntos no excederá 0,50 metros. La cobertura vegetal que presenta la zona es de media altura, evidenciándose árboles y rastrojos típicos de la zona. La topografía comprende una longitud total de 1050 metros y se levantaron 118 secciones transversales que presentaron irregularidades. Así mismo, se observaron pendientes muy bajas que en consecuencia generan sedimentos a lo largo del canal.



*Figura 20<sup>24</sup>. Perfil del canal de riego Tolima.*

---

<sup>24</sup> Estudio hidrológico e hidráulico para el sector del cruce de la vía férrea con el canal ubicado en el p.k. 881+541 de la vía férrea Chiriguana – santa marta en vía única en el municipio de Aracataca. Memorias de cálculo box culvert sobre el canal Tolima a la altura de la vía férrea Chiriguana – Santa Marta- Informe Técnico AQUA ESTUDIOS Y DISEÑOS INGENIERÍA SAS.

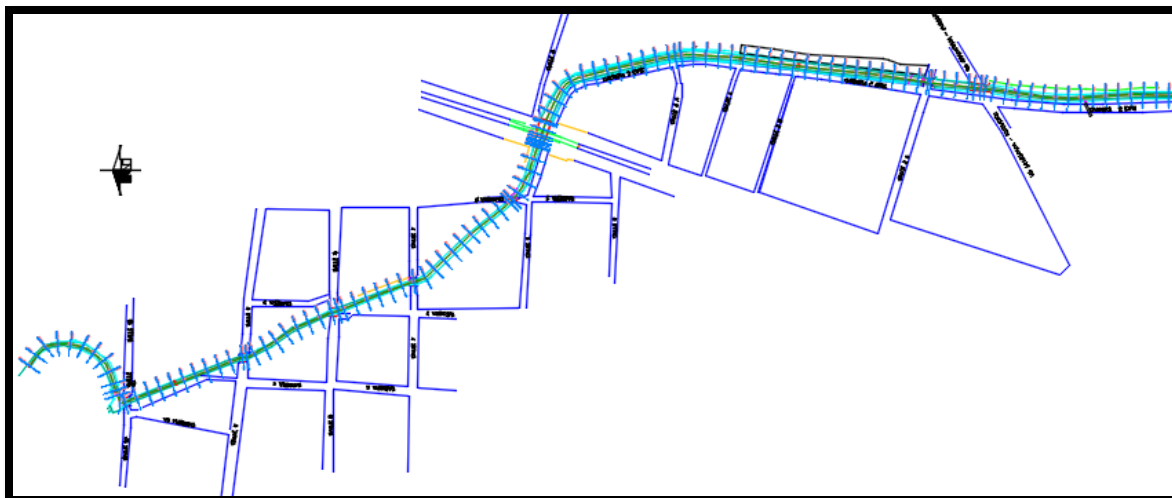


Figura 21.<sup>25</sup> Plano en planta del canal de riego Tolima.

## 10.2 Hidrología del canal.

Para realizar este informe, fue necesaria la recopilación de información secundaria que permite caracterizar los procesos hidrológicos de la zona; los cuales provienen de diferentes entidades: El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – **IDEAM** y el INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI - **IGAC**. Así mismo, los diseños y planos de construcción del puente; y la obtención de información primaria a través de trabajo de campo. Esta última actividad fue desarrollada durante diciembre de 2016 y consistió en la realización de un completo levantamiento topográfico (planimétrico y altimétrico). Además, la batimetría de la corriente en la sección transversal del canal cada 10 metros. También fue necesario la extracción de muestra de suelos para los estudios geotécnicos predominantes del sitio. Con lo anterior, fue posible entre otras cosas, construir un modelo hidráulico que simulara las condiciones reales del

<sup>25</sup> Estudio hidrológico e hidráulico para el sector del cruce de la vía férrea con el canal ubicado en el p.k. 881+541 de la vía férrea Chiriguana – santa marta en vía única en el municipio de Aracataca. Memorias de cálculo box culvert sobre el canal Tolima a la altura de la vía férrea Chiriguana – Santa Marta- Informe Técnico AQUA ESTUDIOS Y DISEÑOS INGENIERÍA SAS.

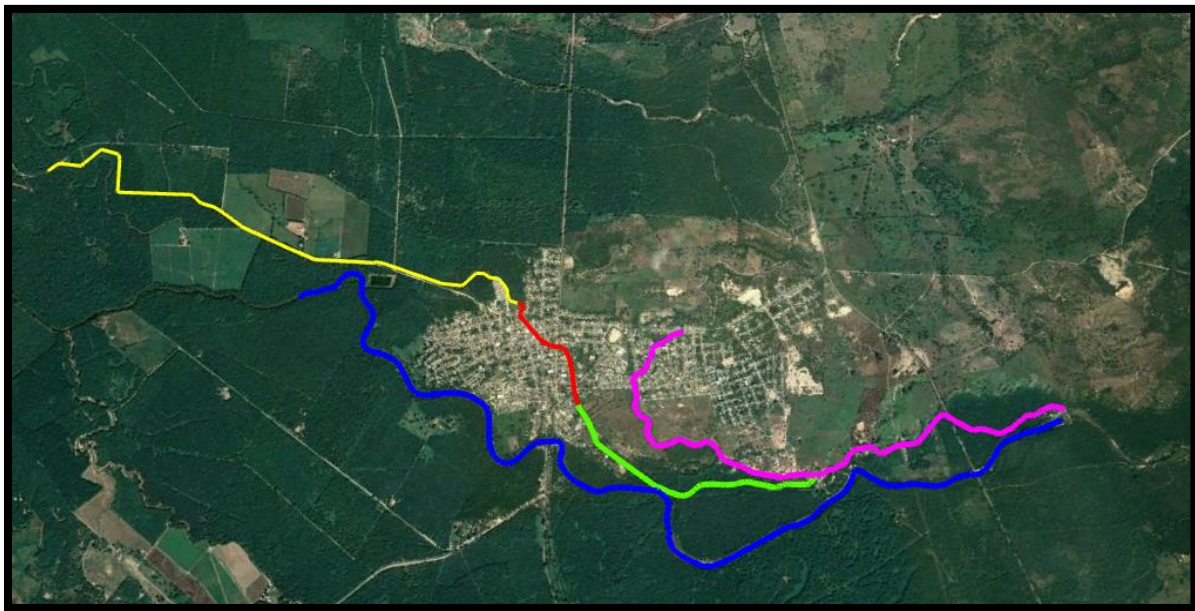
canal, establecer su capacidad hidráulica y obtener una herramienta para el dimensionamiento de la estructura diseñada.

Por otra parte, se empleó un software de uso libre que funciona bajo plataforma de Sistemas de Información Geográfica con el fin de desarrollar e integrar la modelación hidrológica, el levantamiento topográfico y el componente hidráulico para la simulación de las corrientes de los ríos. En el programa se procesaron las precipitaciones de las diferentes estaciones meteorológicas cercanas; también se obtuvieron las áreas de drenajes aferentes a cada río con sus modelos digitales de terreno que son insumos básicos para estimar el potencial de evacuación de aguas provenientes de escorrentía superficial.

Específicamente, en el KM 881+541, la vía férrea cruza con el canal Tolima, el cual, es una corriente artificial en piedra pegada revestida en concreto. Actualmente, este canal pasa por debajo de un carretable y de la vía férrea en el sitio señalado por intermedio de cinco (5) tubos de 1 metro de diámetro cada uno y al cruzar la vía férrea vuelve a ser un canal en piedra pegada revestido con concreto. Se encuentran tuberías de alcantarillado existentes sobre el cruce actual del canal Tolima sobre la vía férrea como se muestra en la figura 1.

## 11. Caracterización de la cuenca

- Cuenca: Canal Tolima
- Naturaleza: Canal artificial
- Uso Agua: Agrícola
- Administrador: Distrito de Riego USOARACATACA



*Figura 22<sup>26</sup>. Trazado Canal Tolima, bocatoma Antioquia sobre el río Aracataca.*

<sup>26</sup> Estudio hidrológico e hidráulico para el sector del cruce de la vía férrea con el canal ubicado en el p.k. 881+541 de la vía férrea Chiriguaná – santa marta en vía única en el municipio de Aracataca. Memorias de cálculo box culvert sobre el canal Tolima a la altura de la vía férrea Chiriguaná – Santa Marta- Informe Técnico AQUA ESTUDIOS Y DISEÑOS INGENIERÍA SAS.

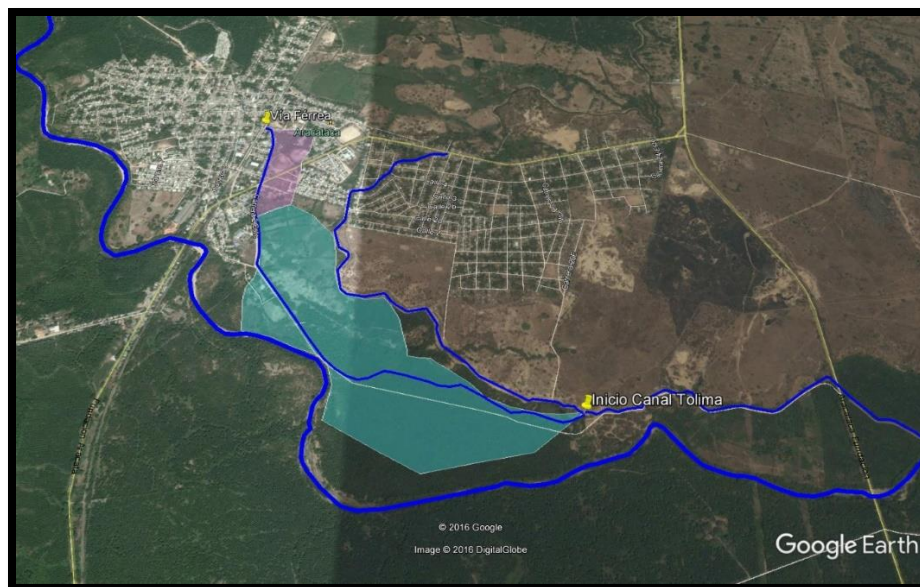


Figura 23<sup>27</sup>. Delimitación de la cuenca del Canal Tolima, trazados Canal Tolima y río Aracataca.

### 11.1 Análisis hidrológico.

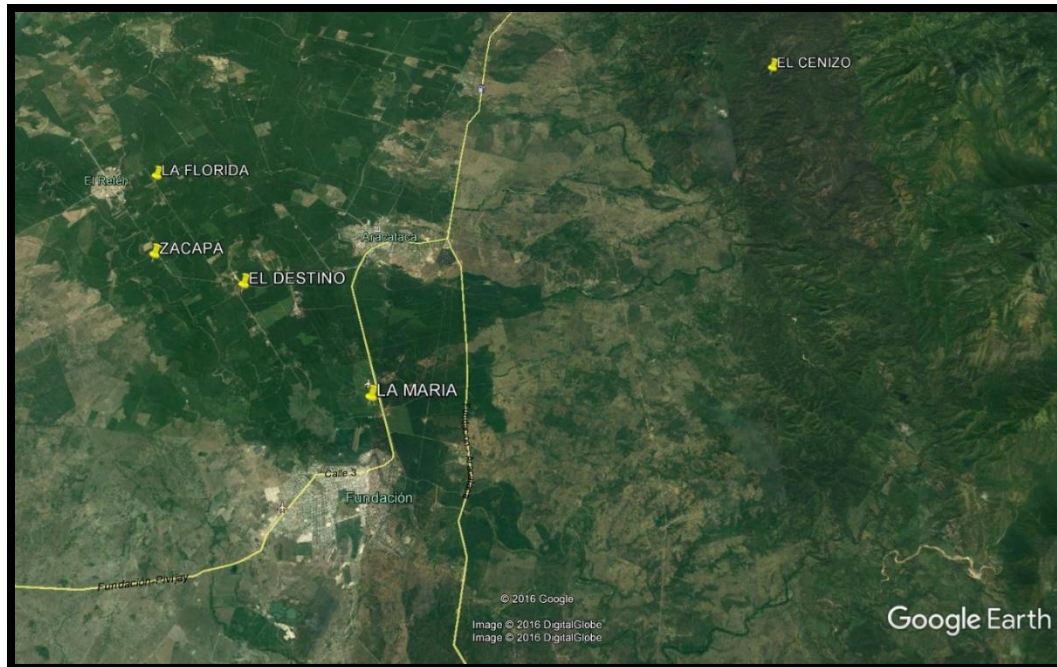
El componente hidrológico realizado se basa en el procesamiento y análisis de los registros históricos de precipitación de las estaciones meteorológicas del IDEAM, con el fin de preveer futuros eventos de precipitación y evaluar, posteriormente, la respuesta del terreno ante ellos.

Las estaciones pluviométricas del IDEAM más cercanas a la cuenca objeto de estudio son las siguientes: el Cenizo, La Florida, Zacapa, El Destino y La María.

En la siguiente ilustración se presenta una localización general de las estaciones pluviométricas IDEAM dentro de la cuenca del canal Tolima.

<sup>27</sup>Estudio hidrológico e hidráulico para el sector del cruce de la vía férrea con el canal ubicado en el p.k. 881+541 de la vía férrea Chiriguaná – santa marta en vía única en el municipio de Aracataca. Memorias de cálculo box culvert sobre el canal Tolima a la altura de la vía férrea Chiriguaná – Santa Marta- Informe Técnico AQUA ESTUDIOS Y DISEÑOS INGENIERÍA SAS.





*Figura 24<sup>28</sup>. Estaciones IDEAM pluviométricas Canal Tolima*

Adicionalmente, en visita realizada a las instalaciones del distrito de riego USOARACATACA, administrador del canal Tolima, se recibió la información correspondiente a la operación de dicha corriente, mediante la cual, se transporta un caudal máximo de  $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Adicionalmente, teniendo en cuenta su carácter agrícola, se encuentra a máxima capacidad en época de sequía, mientras que, en época de lluvias, el caudal transportado es mínimo. A pesar de lo anterior y empleando un criterio conservador, el caudal de diseño seleccionado será el resultante de la suma del caudal de aguas lluvias y el correspondiente a la operación del distrito de riego.

---

<sup>28</sup> Google Earth, Elaboración propia

## **11.2 Procesamiento de datos.**

Para el análisis hidrológico fue necesaria información base secundaria recopilada en el IDEAM y el IGAC, levantamientos topográficos planimétrico y altimétrico suministrado por el cliente e información levantada en campo. Así mismo, se requirió del análisis de información geográfica, imágenes satelitales y del relieve de la zona, con el fin de delimitar con exactitud la cuenca objeto de estudio. Para delimitar la cuenca de la zona de estudio fueron empleados de igual forma planos del IGAC. Lo anterior, se procesó en el software Arc gis para obtener el modelo de elevación digital de zona, las longitudes de los cauces principales y sus ramificaciones y la delimitación de la cuenca que involucra la zona de estudio, objeto de contrato.

### ***11.2.1 Análisis de la precipitación.***

Al identificarse las estaciones climatológicas del IDEAM que hacen parte de la cuenca, se analizaron los datos de precipitación reportados por cada estación. Para el procesamiento de la información se tuvieron en cuenta los valores máximos, medios y mínimos mensuales de precipitación, la precipitación máxima promedio mensual en 24 horas, máxima anual en 24 horas. Los análisis de valores extremos fueron procesados y obtenidos empleando la distribución de probabilidades pluviométricas de GUMBEL.

Análisis de valores extremos empleando la distribución de probabilidades pluviométricas de GUMBEL.

Distribución de probabilidades pluviométricas mediante Gumbel																																																	
Cálculo variables probabilísticas		Cálculo de las Precipitaciones Diarias Máximas Probables para distintas frecuencias																																															
$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} = 98.41 \text{ mm}$		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Periodo Retorno</th><th>Variable Reducida</th><th>Precip. (mm)</th><th>Prob. de ocurrencia</th><th>Corrección intervalo fijo</th></tr> <tr> <th>Años</th><th>YT</th><th>XT'(mm)</th><th>F(xT)</th><th>XT (mm)</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>2</td><td>0.3665</td><td>93.5226</td><td>0.5000</td><td>105.6805</td></tr> <tr><td>5</td><td>1.4999</td><td>119.8192</td><td>0.8000</td><td>135.3957</td></tr> <tr><td>10</td><td>2.2504</td><td>137.2299</td><td>0.9000</td><td>155.0698</td></tr> <tr><td>20</td><td>2.9702</td><td>153.9306</td><td>0.9500</td><td>173.9416</td></tr> <tr><td>50</td><td>3.9019</td><td>175.5480</td><td>0.9800</td><td>198.3693</td></tr> <tr><td>100</td><td>4.6001</td><td>191.7472</td><td>0.9900</td><td>216.6743</td></tr> <tr><td>500</td><td>6.2136</td><td>229.1811</td><td>0.9980</td><td>258.9746</td></tr> </tbody> </table>			Periodo Retorno	Variable Reducida	Precip. (mm)	Prob. de ocurrencia	Corrección intervalo fijo	Años	YT	XT'(mm)	F(xT)	XT (mm)	2	0.3665	93.5226	0.5000	105.6805	5	1.4999	119.8192	0.8000	135.3957	10	2.2504	137.2299	0.9000	155.0698	20	2.9702	153.9306	0.9500	173.9416	50	3.9019	175.5480	0.9800	198.3693	100	4.6001	191.7472	0.9900	216.6743	500	6.2136	229.1811	0.9980	258.9746
Periodo Retorno	Variable Reducida	Precip. (mm)	Prob. de ocurrencia	Corrección intervalo fijo																																													
Años	YT	XT'(mm)	F(xT)	XT (mm)																																													
2	0.3665	93.5226	0.5000	105.6805																																													
5	1.4999	119.8192	0.8000	135.3957																																													
10	2.2504	137.2299	0.9000	155.0698																																													
20	2.9702	153.9306	0.9500	173.9416																																													
50	3.9019	175.5480	0.9800	198.3693																																													
100	4.6001	191.7472	0.9900	216.6743																																													
500	6.2136	229.1811	0.9980	258.9746																																													
$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 29.76 \text{ mm}$																																																	
$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * s = 23.20 \text{ mm}$																																																	
$u = \bar{x} - 0.5772 * \alpha = 85.02 \text{ mm}$																																																	
		$F_{(x)} = e^{-e^{-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)}}$																																															

Figura 25. <sup>29</sup> Distribución de probabilidades pluviométricas mediante Gumbel.

Los datos de precipitaciones analizados, se tomaron de las lluvias máximas de acuerdo con el histórico de cada una de las estaciones pluviométricas. Los periodos de retorno analizados fueron 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años; con el fin de obtener el valor pico de una precipitación que podría ser igualada o superada. En las siguientes tablas se observan los valores de precipitación máxima para cada estación.

- Precipitación Máxima diaria para la cuenca del Canal Tolima, diferentes duraciones y periodos de retorno (mm).

<sup>29</sup> Estudio hidrológico e hidráulico para el sector del cruce de la vía férrea con el canal ubicado en el p.k. 881+541 de la vía férrea Chiriguaná – santa marta en vía única en el municipio de Aracataca. Memorias de cálculo box culvert sobre el canal Tolima a la altura de la vía férrea Chiriguaná – Santa Marta- Informe Técnico AQUA ESTUDIOS Y DISEÑOS INGENIERÍA SAS.

**Tabla 1<sup>30</sup>.***Precipitaciones en los distintos tiempos de duración.*

<b>Duración</b>		<b>Precipitación máxima Pd (mm) por tiempos de duración</b>						
<b>Hr</b>	<b>Min</b>	<b>2 años</b>	<b>5 años</b>	<b>10 años</b>	<b>25 años</b>	<b>50 años</b>	<b>100 años</b>	<b>500 años</b>
<b>24 hr</b>	1440	105.68	135.4	155.07	173.94	198.37	216.67	258.97
<b>18 hr</b>	1080	96.17	123.21	141.11	139.15	180.52	197.17	235.67
<b>12 hr</b>	720	84.54	108.32	124.06	139.15	158.7	173.34	207.18
<b>8 hr</b>	480	71.86	92.07	105.45	118.28	134.89	147.34	176.1
<b>6 hr</b>	360	64.47	82.59	94.59	106.1	121.01	132.17	157.97
<b>5 hr</b>	300	60.24	77.18	88.39	99.15	113.15	123.50	147.62
<b>4 hr</b>	240	54.95	70.41	80.64	90.45	103.15	112.67	134.67
<b>3 hr</b>	180	48.61	62.28	71.33	80.01	91.25	99.67	119.13
<b>2 hr</b>	120	41.22	52.8	60.48	67.84	77.36	84.50	101.00
<b>1 hr</b>	60	31.7	40.62	46.52	52.18	59.51	65.00	77.69

- Teniendo en cuenta el valor de precipitación obtenido y la duración del evento, se obtienen los valores de intensidad.

<sup>30</sup> Estudio hidrológico e hidráulico para el sector del cruce de la vía férrea con el canal ubicado en el p.k. 881+541 de la vía férrea Chiriguaná – santa marta en vía única en el municipio de Aracataca. Memorias de cálculo box culvert sobre el canal Tolima a la altura de la vía férrea Chiriguaná – Santa Marta- Informe Técnico AQUA ESTUDIOS Y DISEÑOS INGENIERÍA SAS.

Tabla 2<sup>31</sup>.*Intensidad de precipitación por Duración de lluvia y Frecuencia*

<b>Duración</b>	<b>Intensidad de la lluvia (mm/hr) según el Periodo de Retorno</b>						
<b>Hr</b>	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
<b>24 hr</b>	4.40	5.64	6.46	7.25	8.27	9.03	10.79
<b>18 hr</b>	5.34	6.85	7.84	7.73	10.03	10.95	13.09
<b>12 hr</b>	7.05	9.03	10.34	11.6	13.22	14.44	17.26
<b>8 hr</b>	8.98	11.51	13.18	14.79	16.86	18.42	22.01
<b>6 hr</b>	10.74	13.77	15.77	17.68	20.17	22.03	26.33
<b>5 hr</b>	12.05	15.44	17.68	19.83	22.61	24.70	29.52
<b>4 hr</b>	13.74	17.6	20.16	22.61	25.79	28.17	33.67
<b>3 hr</b>	16.20	20.76	23.78	26.67	30.42	33.22	39.71
<b>2 hr</b>	20.61	26.4	30.24	33.92	38.68	42.25	50.50
<b>1 hr</b>	31.70	40.62	46.52	52.18	59.51	65.00	77.69

A continuación, se presentan los resultados de las regresiones para los períodos de retorno estudiados.

<sup>31</sup> Estudio hidrológico e hidráulico para el sector del cruce de la vía férrea con el canal ubicado en el p.k. 881+541 de la vía férrea Chiriguana – santa marta en vía única en el municipio de Aracataca. Memorias de cálculo box culvert sobre el canal Tolima a la altura de la vía férrea Chiriguana – Santa Marta- Informe Técnico AQUA ESTUDIOS Y DISEÑOS INGENIERÍA SAS.

Tabla 3<sup>32</sup>.*Resultados de análisis de regresiones para parámetros IDF.*

Periodo de retorno para T= 50 años						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x* ln y	ln x ^2
1	1440	8.27	7.27239839	2.11263451	15.3639198	52.8877784
2	1080	10.03	6.98471632	2.3055806	16.1038265	48.7862621
3	720	13.22	6.57925121	2.58173083	16.9858557	43.2865465
4	480	16.86	6.1737861	2.82494395	17.4405997	38.1156349
5	360	20.17	5.88610403	3.00419635	17.6830123	34.6462207
6	300	22.61	5.70378247	3.11839229	17.7866313	32.5331345
7	240	25.79	5.48063892	3.24998682	17.8120043	30.037403
8	180	30.42	5.19295685	3.41510029	17.7344684	26.9668009
9	120	38.68	4.78749174	3.65532267	17.4998271	22.9200772
10	60	59.51	4.09434456	4.08614437	16.730083	16.7636574
Total	4980	245.56	58.1554706	30.3540327	171.140228	346.943515
Ln (d) =		d = 749.9400		n = -0.6164		
6.6200						

<sup>32</sup> Estudio hidrológico e hidráulico para el sector del cruce de la vía férrea con el canal ubicado en el p.k. 881+541 de la vía férrea Chiriguaná – santa marta en vía única en el municipio de Aracataca. Memorias de cálculo box culvert sobre el canal Tolima a la altura de la vía férrea Chiriguaná – Santa Marta- Informe Técnico AQUA ESTUDIOS Y DISEÑOS INGENIERÍA SAS.

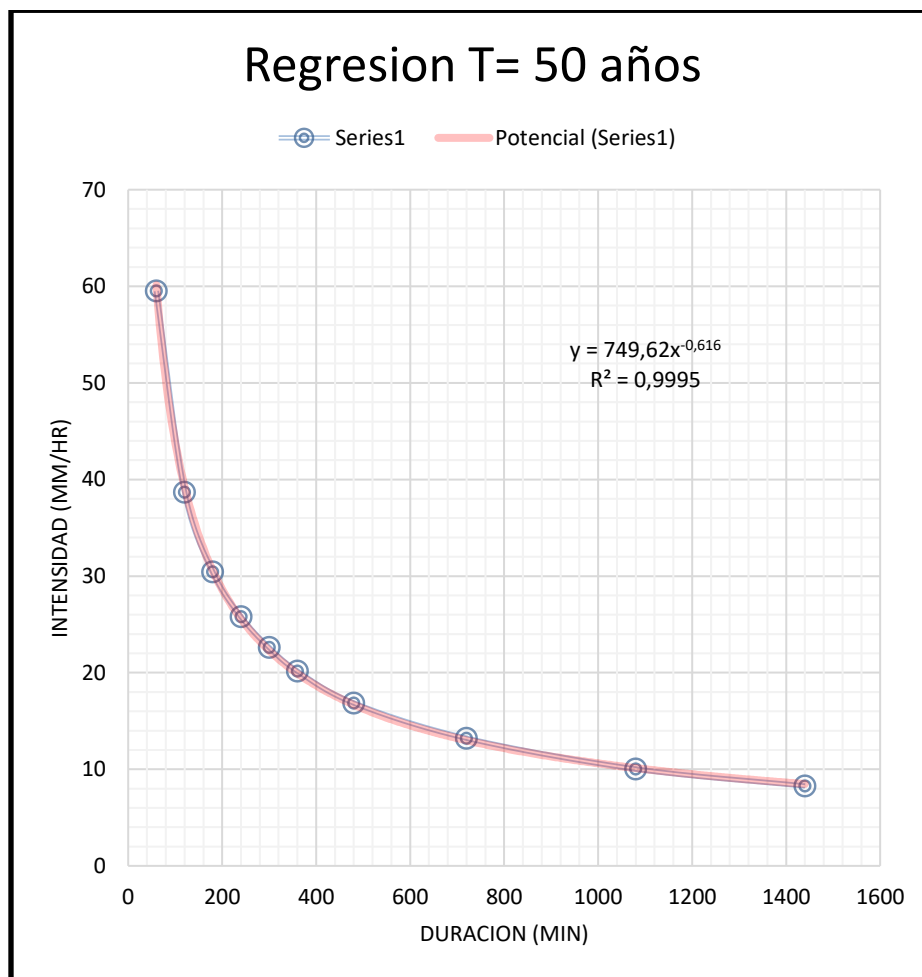


Figura 26. Grafica de regresión T= 50 años de resultados tomados de la tabla.

**Tabla 4.**<sup>33</sup>.*Resultados de análisis de regresiones para parámetros IDF.*

<b>Periodo de retorno para T= 100 años</b>						
<b>Nº</b>	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>ln x</b>	<b>ln y</b>	<b>ln x* ln y</b>	<b>ln x ^2</b>
<b>1</b>	1440	9.03	7.27239839	2.20055237	16.0032935	52.8877784
<b>2</b>	1080	10.95	6.98471632	2.39333946	16.7167972	48.7862621
<b>3</b>	720	14.44	6.57925121	2.67000213	17.5666148	43.2865465
<b>4</b>	480	18.42	6.1737861	2.91343703	17.9869371	38.1156349
<b>5</b>	360	22.03	5.88610403	3.09240516	18.2022185	34.6462207
<b>6</b>	300	24.70	5.70378247	3.20680324	18.2909081	32.5331345
<b>7</b>	240	28.17	5.48063892	3.33825758	18.2957844	30.037403
<b>8</b>	180	33.22	5.19295685	3.5031521	18.1917177	26.9668009
<b>9</b>	120	42.25	4.78749174	3.74360435	17.9224749	22.9200772
<b>10</b>	60	65.00	4.09434456	4.17438727	17.0913798	16.7636574
<b>Total</b>	4980	268.21	58.1554706	31.2359407	176.268126	346.943515
<b>Ln (d) =</b>		<b>d = 819.2200</b>		<b>n = -0.6164</b>		
<b>6.7083</b>						

<sup>33</sup> Estudio hidrológico e hidráulico para el sector del cruce de la vía férrea con el canal ubicado en el p.k. 881+541 de la vía férrea Chiriguaná – santa marta en vía única en el municipio de Aracataca. Memorias de cálculo box culvert sobre el canal Tolima a la altura de la vía férrea Chiriguaná – Santa Marta- Informe Técnico AQUA ESTUDIOS Y DISEÑOS INGENIERÍA SAS.



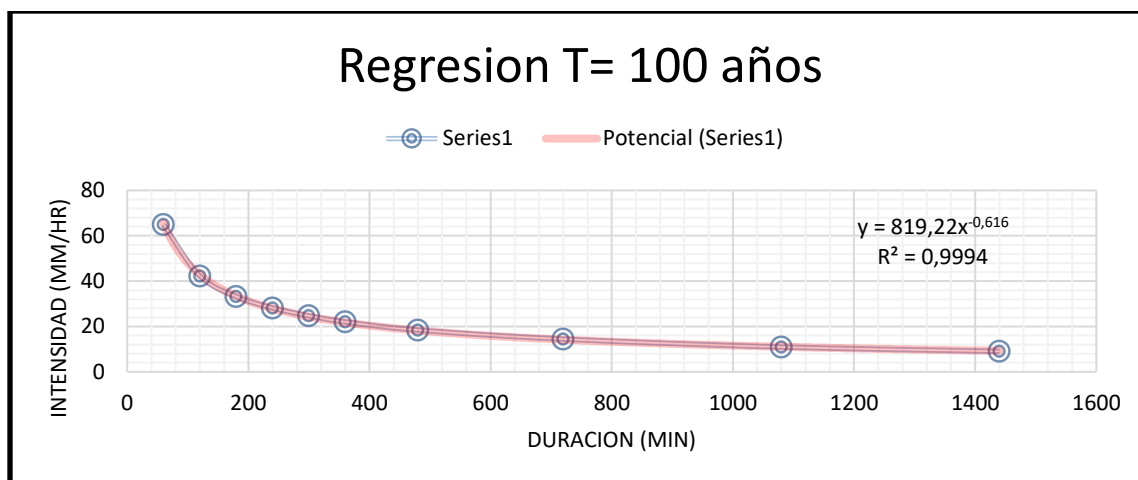


Figura 27.<sup>34</sup> Grafica de regresión T= 100 años de resultados tomados de la tabla.

En función del cambio de variable realizado, se realiza otra regresión de potencia entre las columnas del periodo de retorno (T) y el término constante de regresión (d), para obtener valores de la ecuación:

Empleando una regresión potencial a nivel general se obtienen los parámetros finales y un aceptable valor de ajuste.

<sup>34</sup> Estudio hidrológico e hidráulico para el sector del cruce de la vía férrea con el canal ubicado en el p.k. 881+541 de la vía férrea Chiriguaná – santa marta en vía única en el municipio de Aracataca. Memorias de cálculo box culvert sobre el canal Tolima a la altura de la vía férrea Chiriguaná – Santa Marta- Informe Técnico AQUA ESTUDIOS Y DISEÑOS INGENIERÍA SAS.

**Tabla 5.**<sup>35</sup>*Análisis de regresión potencial para la determinación de parámetros de curvas de IDF.*

<b>Regresión Potencial</b>						
N°	x	y	ln x	ln y	ln x * ln y	ln x <sup>2</sup>
1	2	399.5278	0.69314718	5.99028335	4.15214801	0.48045301
2	5	511.8669	1.60943791	6.23806463	10.0397777	2.59029039
3	10	586.2452	2.30258509	6.37373813	14.6760744	5.30189811
4	25	717.6292	3.21887582	6.575953	21.1671761	10.3611616
5	50	749.94	3.91202301	6.6199932	25.8975657	15.303924
6	100	829.1428	4.60517019	6.7203924	30.9485507	21.2075924
7	500	979.06	6.2146081	6.88659293	42.7974762	38.6213538
<b>Total</b>	692	4773.4119	22.5558473	45.4050176	149.678769	93.8666733
<b>Ln (K) =</b>		K = 393.2364		m = 0.1584		
<b>5.9744</b>						

<sup>35</sup> Estudio hidrológico e hidráulico para el sector del cruce de la vía férrea con el canal ubicado en el p.k. 881+541 de la vía férrea Chiriguaná – santa marta en vía única en el municipio de Aracataca. Memorias de cálculo box culvert sobre el canal Tolima a la altura de la vía férrea Chiriguaná – Santa Marta- Informe Técnico AQUA ESTUDIOS Y DISEÑOS INGENIERÍA SAS.

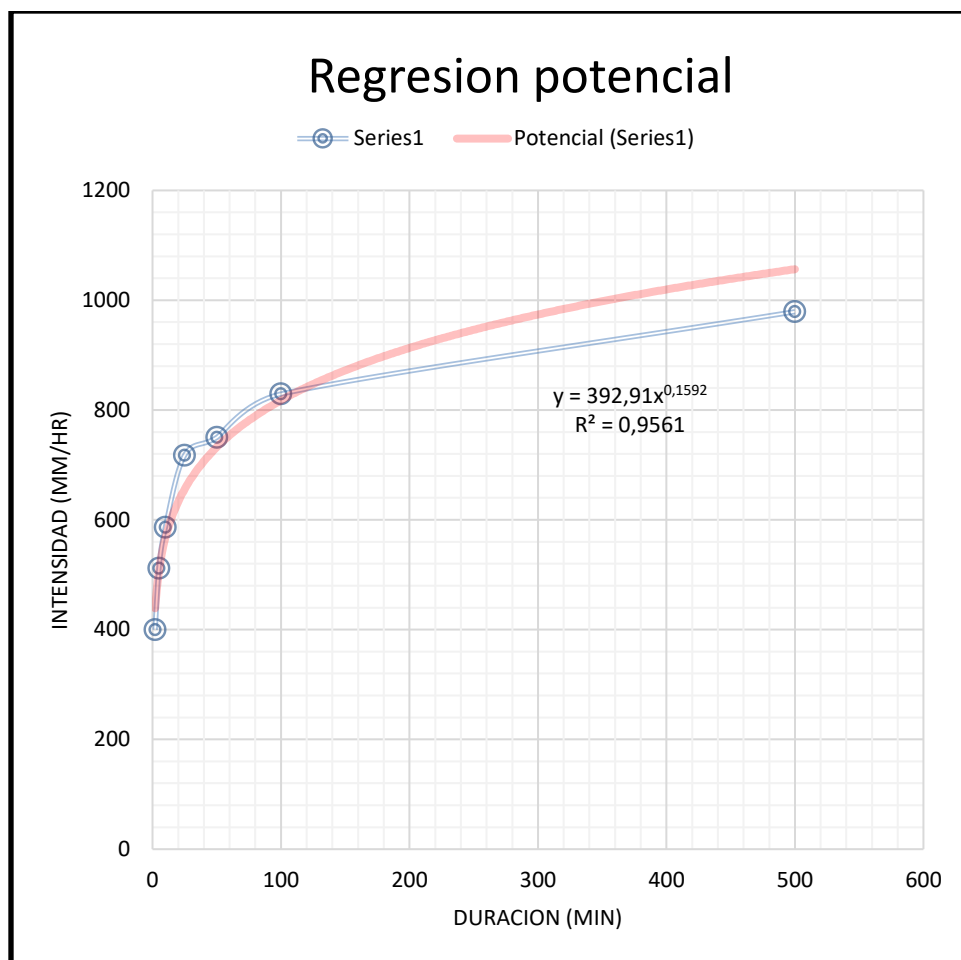


Figura 28. Grafica de regresión potencial de resultados tomados de la tabla.

Finalmente, la curva IDF obtenida.

**Tabla 6.**<sup>36</sup>

*Relación Intensidad, duración frecuencia para la cuenca Canal Tolima.*

<b>Duración</b>	<b>Intensidad de la lluvia (mm/hr) según el Periodo de Retorno</b>						
<b>Hr</b>	2 años	5 años	10 años	20 años	50 años	100 años	500 años
<b>24 hr</b>	4.40	5.64	6.46	7.25	8.27	9.03	10.79
<b>18 hr</b>	5.34	6.85	7.84	7.73	10.03	10.95	13.09
<b>12 hr</b>	7.05	9.03	10.34	11.6	13.22	14.44	17.26
<b>8 hr</b>	8.98	11.51	13.18	14.79	16.86	18.42	22.01
<b>6 hr</b>	10.74	13.77	15.77	17.68	20.17	22.03	26.33
<b>5 hr</b>	12.05	15.44	17.68	19.83	22.61	24.70	29.52
<b>4 hr</b>	13.74	17.6	20.16	22.61	25.79	28.17	33.67
<b>3 hr</b>	16.20	20.76	23.78	26.67	30.42	33.22	39.71
<b>2 hr</b>	20.61	26.4	30.24	33.92	38.68	42.25	50.50
<b>1 hr</b>	31.70	40.62	46.52	52.18	59.51	65.00	77.69

<sup>36</sup> Estudio hidrológico e hidráulico para el sector del cruce de la vía férrea con el canal ubicado en el p.k. 881+541 de la vía férrea Chiriguaná – santa marta en vía única en el municipio de Aracataca. Memorias de cálculo box culvert sobre el canal Tolima a la altura de la vía férrea Chiriguaná – Santa Marta- Informe Técnico AQUA ESTUDIOS Y DISEÑOS INGENIERÍA SAS.

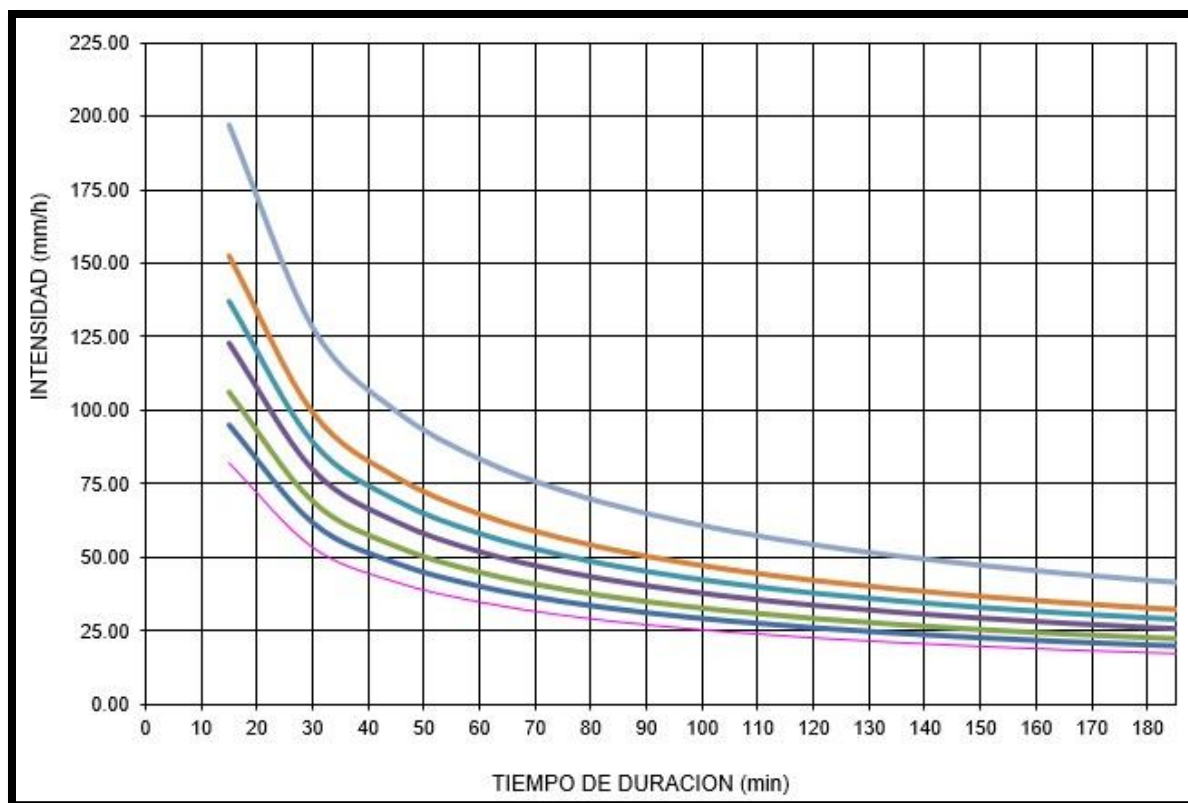


Figura 29<sup>37</sup>. Curva resultante de Intensidad – Duración – Frecuencia de la zona objeto de estudio Cuenca canal Tolima.

### 11.2.2 Selección periodo de retorno

De acuerdo con la normatividad vigente en nuestro país, los períodos de retorno se definen de acuerdo a las características del área de drenaje, los daños, perjuicios o molestias que las inundaciones puedan causar a sus habitantes, el cual, está asociado a las características de protección e importancia del área de estudio.

<sup>37</sup> Estudio hidrológico e hidráulico para el sector del cruce de la vía férrea con el canal ubicado en el p.k. 881+541 de la vía férrea Chiriguaná – santa marta en vía única en el municipio de Aracataca. Memorias de cálculo box culvert sobre el canal Tolima a la altura de la vía férrea Chiriguaná – Santa Marta- Informe Técnico AQUA ESTUDIOS Y DISEÑOS INGENIERÍA SAS.

Para el caso específico del proyecto, dada la importancia de la vía férrea y para la economía de la región, se recomienda un período de retorno de 100 años correspondiente a cuencas, ríos, quebradas y arroyos en canales abiertos en zonas planas, medias y altas acorde con las características de nuestras cuencas.

### 11.2.3 Estimación del caudal de precipitación.

Para el cálculo de la escorrentía directa producida por la precipitación efectiva se empleó el método racional, considerando las características de la cuenca.

**Tabla 7.**<sup>38</sup>

*Características de la cuenca estudiada.*

Área	ID	Area	Area	Perímetro	Longitud	Longitud	Cota Mx	Cota Min	S
Km2		m2	Ha	m	m	Km	m	m	m/m
0.79	1	790300	79.03	-	2654	2.654	45	37	0.00301

Teniendo en cuenta lo anterior, se tiene un caudal de diseño de  $4.62 \text{ m}^3/\text{s}$ , resultante de la suma entre el caudal pluvial ( $2.02 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y el caudal máximo por concesión de USOARACATACA ( $2.60 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

<sup>38</sup> Estudio hidrológico e hidráulico para el sector del cruce de la vía férrea con el canal ubicado en el p.k. 881+541 de la vía férrea Chiriguaná – santa marta en vía única en el municipio de Aracataca. Memorias de cálculo box culvert sobre el canal Tolima a la altura de la vía férrea Chiriguaná – Santa Marta- Informe Técnico AQUA ESTUDIOS Y DISEÑOS INGENIERÍA SAS.

## 12. Toma de velocidades y cálculo de caudales.

La información antes dicha, la suministró la empresa AQUA ESTUDIOS Y DISEÑOS INGENIERÍA SAS, al igual que la topografía general donde se obtienen detalles de las secciones transversales. Una vez analizada la información, se procedió a extraer las coordenadas X y Y para introducirlas en HEC RAS. Seguidamente un ejemplo de lo dicho anteriormente.

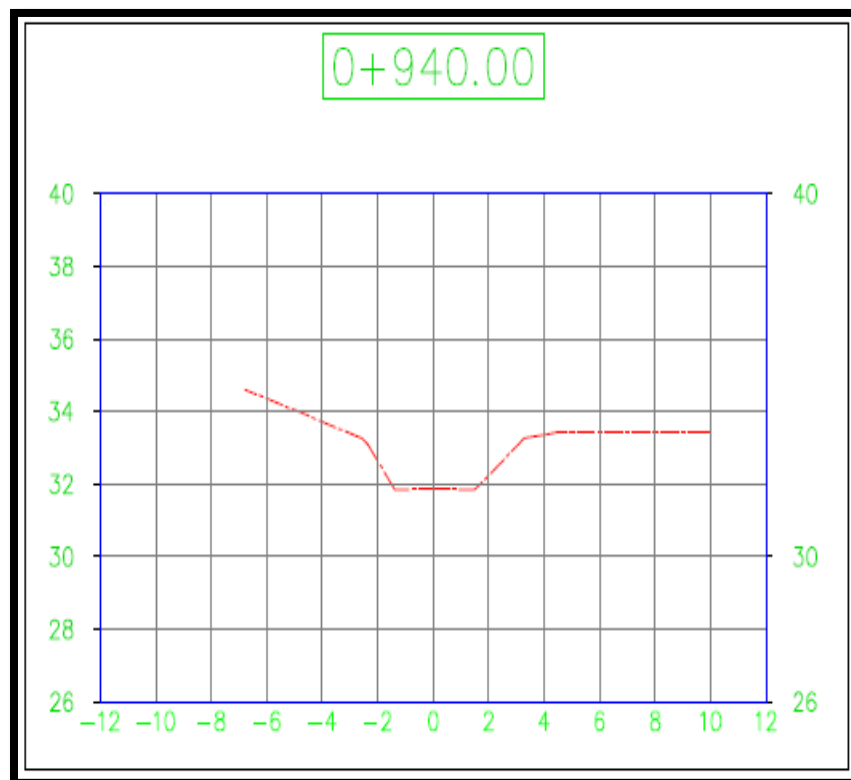
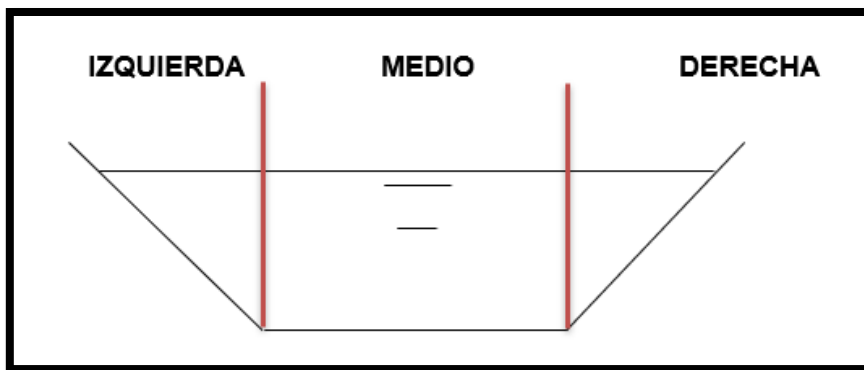


Figura 30<sup>39</sup>. Sección transversal K0+940 inicio del canal

<sup>39</sup> Estudio hidrológico e hidráulico para el sector del cruce de la vía férrea con el canal ubicado en el p.k. 881+541 de la vía férrea Chiriguaná – Santa Marta en vía única en el municipio de Aracataca. Memorias de cálculo box culvert sobre el canal Tolima a la altura de la vía férrea Chiriguaná – Santa Marta- Informe Técnico AQUA ESTUDIOS Y DISEÑOS INGENIERÍA SAS.



*Figura 31.* Esquema básico de sección para su análisis de velocidades

Una vez hecho el esquema de la figura 31 se estiman las áreas que conforman cada una de las partes y se obtiene la información de la tabla 9:

**Tabla 8. Tabla de áreas sección K0+940**

ÁREA (m <sup>2</sup> )	IZQUIERDO	MEDIO	DERECHA
	0,863	1,58	0,564



**Tabla 9.***Coordenadas de la sección transversal.*

<b>K0+940</b>	
<b>X</b>	<b>Y</b>
<b>0</b>	34.62
<b>3.221</b>	34.607
<b>7.226</b>	33.326
<b>7.433</b>	33.266
<b>7.63</b>	33.103
<b>8.613</b>	31.855
<b>10</b>	31.848
<b>10.026</b>	31.847
<b>11.501</b>	31.84
<b>13.095</b>	33.126
<b>13.277</b>	33.265
<b>13.423</b>	33.287
<b>14.117</b>	33.37
<b>14.473</b>	33.43
<b>19.536</b>	33.459
<b>20</b>	33.459

**Tabla 10.***Velocidades*

Márgenes	Izquierdo	Medio	Derecha	
VELOCIDAD	0,85	0,81	0,62	
(m/s)	0,85	0,82	0,62	
	0,84	0,82	0,62	
	0,84	0,82	0,63	
	0,84	0,81	0,63	
	0,84	0,84	0,62	
	0,84	0,85	0,63	
	0,83	0,81	0,62	
	0,83	0,83	0,62	
	0,84	0,84	0,63	
	0,84	0,85	0,63	
	0,84	0,86	0,61	
	0,85	0,85	0,61	
	0,84	0,84	0,62	
	0,84	0,83	0,61	
	0,83	0,82	0,6	
	0,82	0,83	0,61	
	0,83	0,82	0,62	
	0,83	0,82	0,63	
	0,83	0,83	0,63	
	0,83	0,83	0,63	
	0,840	0,830	0,620	Total
V (m/s)	0,73	1,32	0,35	2.40

Aplicando la ecuación de continuidad

$$Q = (V \times A) \text{ Ecuación 14.}$$

$$Q = (0,84 \times 0,863) = 0,73 \text{ (m}^3\text{/s)}$$

$$Q = (0,83 \times 1,58) = 1,32 \text{ (m}^3\text{/s)}$$

$$Q = (0,62 \times 0,35) = 0,73 \text{ (m}^3\text{/s)}$$

$$Q_{total} = 2,40 \text{ (m}^3\text{/s)}$$

**Tabla 11.**

*Caudales de totales de las secciones críticas de estudio*

Secciones (críticas)	Caudal(m <sup>3</sup> /s)
<b>K0+940</b>	2,40 (m <sup>3</sup> /s)
<b>K0+870</b>	2,36 (m <sup>3</sup> /s)
<b>K0+810</b>	2,13 (m <sup>3</sup> /s)
<b>K0+610</b>	2,02 (m <sup>3</sup> /s)
<b>K0+540</b>	2,02 (m <sup>3</sup> /s)
<b>Promedio</b>	2,12 (m <sup>3</sup> /s)

Luego de haber determinado los caudales de las secciones críticas del canal de riego Tolima, se observa que los valores oscilan en un rango aceptable lo que significa que los caudales son muy regulares en cada sección estudiada. Se tiene en cuenta que las secciones del canal no presentan geometrías constantes.

### **13. Simulación del canal de riego Tolima, con ayuda del software HEC-RAS.**

En este capítulo se realizarán simulaciones para las secciones trapezoidal y rectangular, así como también diferentes valores de  $n$  de Manning y de caudal, para determinar cuál presenta mejor comportamiento hidráulico.

Las condiciones del caudal que presenta el canal en condiciones normales es de  $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$ . Esta condición corresponde al caudal máximo en operaciones normales. Para realizar cualquier simulación en HEC-RAS es necesario contar con las secciones transversales de la zona de estudio, en este caso, las del canal Tolima fueron recolectadas mediante un estudio topográfico. Una vez procesados los datos de las secciones transversales con la herramienta de Excel, se procede a introducirlas en el programa HEC-RAS. Para realizar este análisis, se cuenta con las características siguientes:

#### **13.1 Parámetros de diseño para la modelación (condiciones de fronteras).**

- Tipo de flujo: flujo permanente.
- Profundidad normal.
- Periodo de retorno 100 años.
- Pendiente: de aguas arriba hacia aguas abajo  $0.0069$ , cota mayor 38 metros y cota menor 36 metros. Distancia de recorrido 287 metros, pendiente en porcentaje  $0.69\% < 1\%$ .
- Caudal de funcionamiento:  $2.6 \text{ m}^3/\text{seg}$  (suministrado por el distrito de riego Usoaracataca).

- Caudal hidrológico calculado: 2.02 m<sup>3</sup>/seg (suministrado por Aqua estudios y diseños de ingeniería s.a.s).
- Caudal modelado: caudal de funcionamiento + caudal hidrológico calculado (2.6 m<sup>3</sup>/s + 2.02 m<sup>3</sup>/s) = 4.62 m<sup>3</sup>/seg.
- Análisis de flujo: número de froude  $F = \frac{v}{\sqrt{gD}} = \frac{2.4 \text{ m/s}}{\sqrt{(9.81 \text{ m/s}^2 * 2.58)}} = 0.47$ , entonces,  $0.47 < 1$ , régimen sub-crítico.
- Volumen calculado de sedimentos dentro del canal 220 m<sup>3</sup>.
- Material del canal: 0.03 a los lados (lados de piedra cementada) y 0.02 (concreto sin pulir, formaleta en madera rugosa).
- Sección irregular a lo largo del canal.

Para modelar la superficie del terreno, se realizó un modelo digital de elevación de la superficie del terreno, de acuerdo con la topografía actual mediante el software AUTOCAD versión 2016. Las secciones están distribuidas cada 10 metros, toda la información se exportó al programa HEC-RAS.

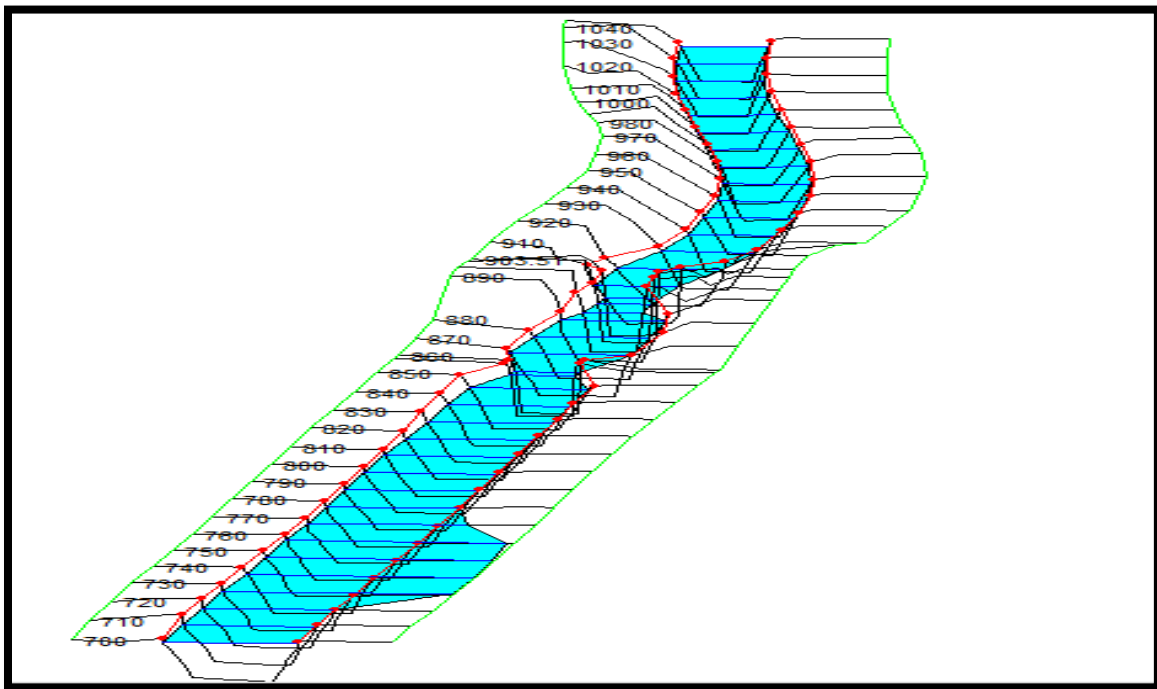
### 13.2 Escenario 1 (modelación actual).

#### 13.2.1 Abscisa 1050 a 700. Inicio de la modelación (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo).

**Tabla 12.**

*Abscisa 1050 a 700. Inicio de la modelación (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo)*

Tramo	Volumen de sedimentos (m <sup>3</sup> )	Desbordamientos	Puntos críticos
1050 a 780	8.65	no se presentan.	no existen.
780 a 720	4.43	si, (lado izquierdo).	ver f.33 y ver f.34
720 a 700	1.92	no se presentan.	no existen.



*Figura 32. tramo del canal entre la abscisa 1050 a 700.*

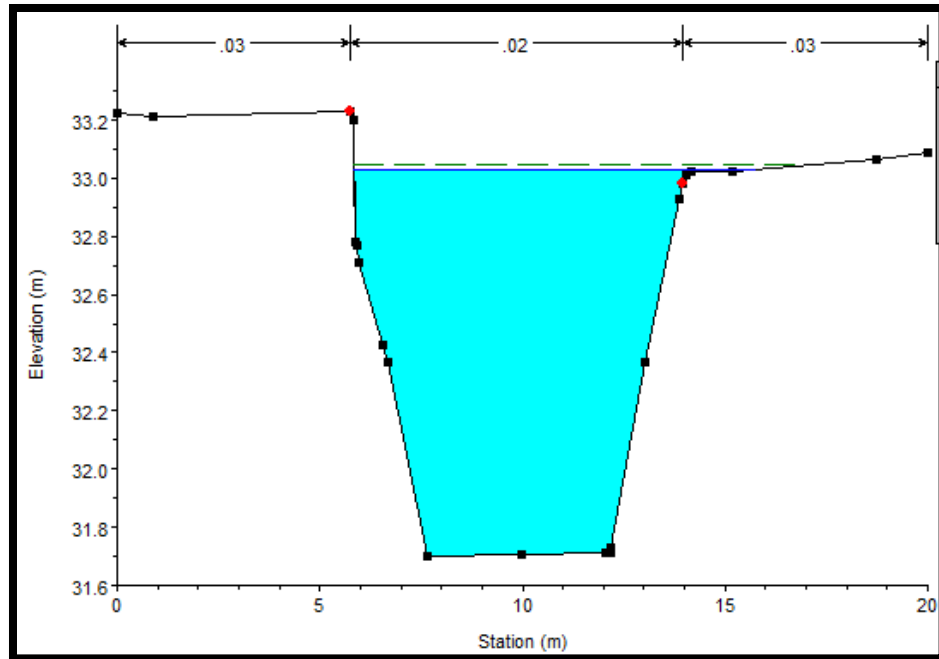


Figura 33. sección transversal 770 con desbordamiento lado izquierdo.

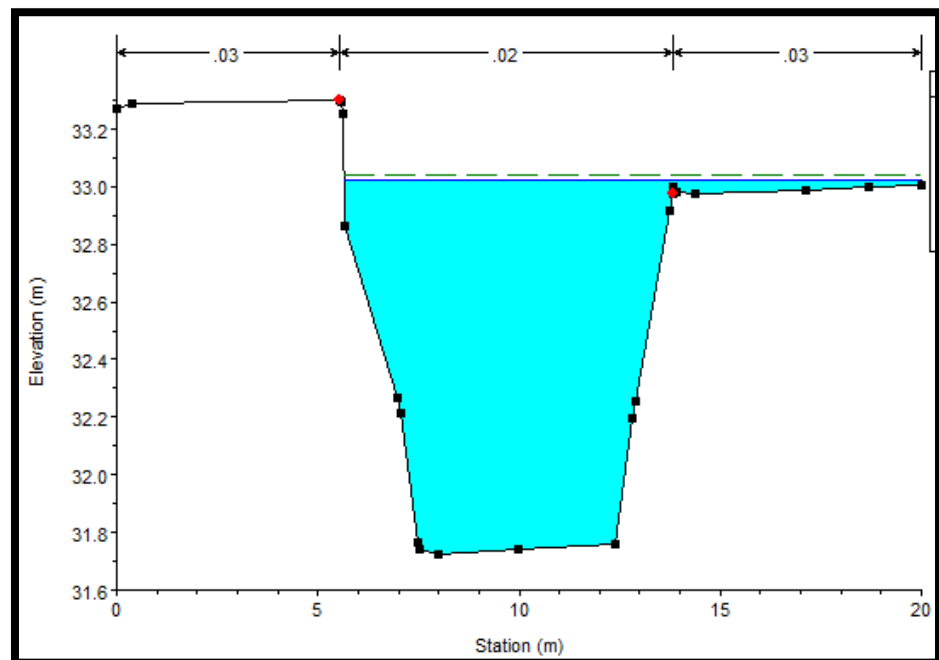


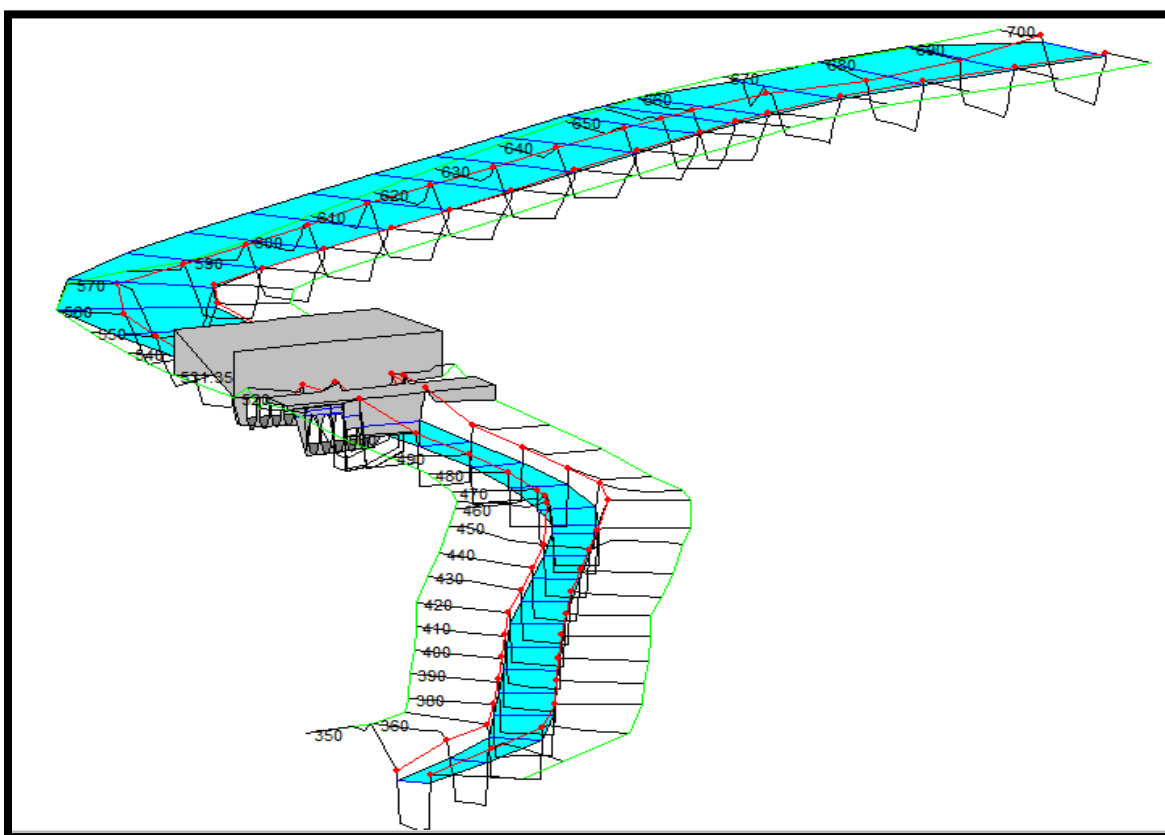
Figura 34. sección transversal 730 con desbordamiento lado izquierdo.

### 13.2.2 Abscisa 700 a 350. (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo).

**Tabla 13.**

*Abscisa 700 a 350. Inicio de la modelación (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo)*

Tramo	Volumen de sedimentos (m <sup>3</sup> )	Desbordamientos	Puntos críticos
<b>690 a 531</b>	54.48	si, lado derecho.	ver f. 36, 37, 38 y 39
<b>531 a 350</b>	28.23	no se presentan.	no existen.



*Figura 35. tramo del canal entre la abscisa 700 a 350.*



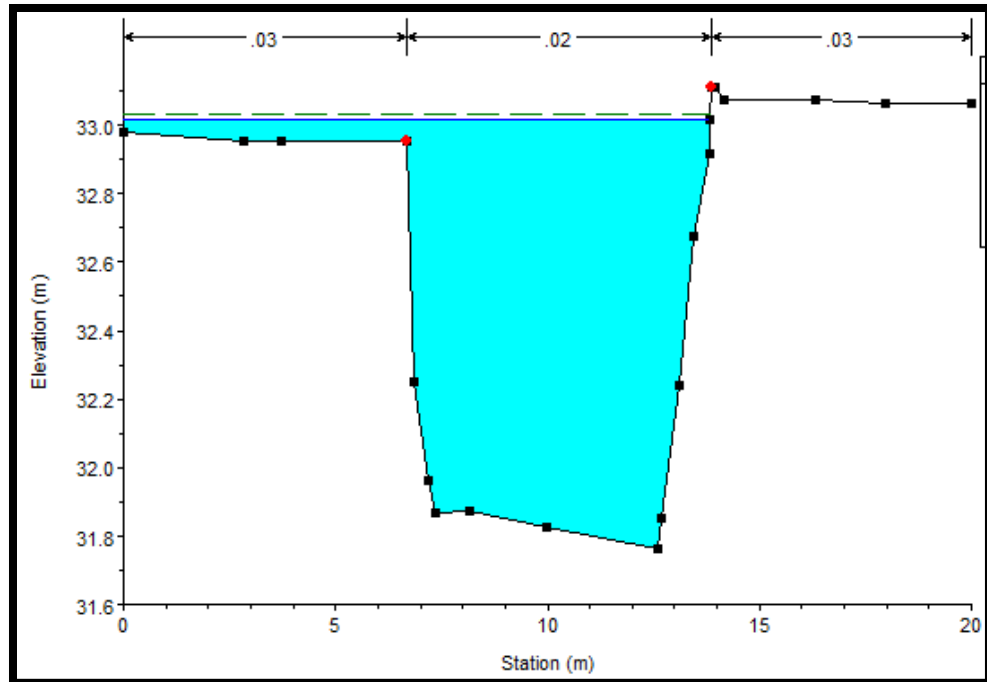


Figura 36. Sección transversal 690 con desbordamiento lado derecho.

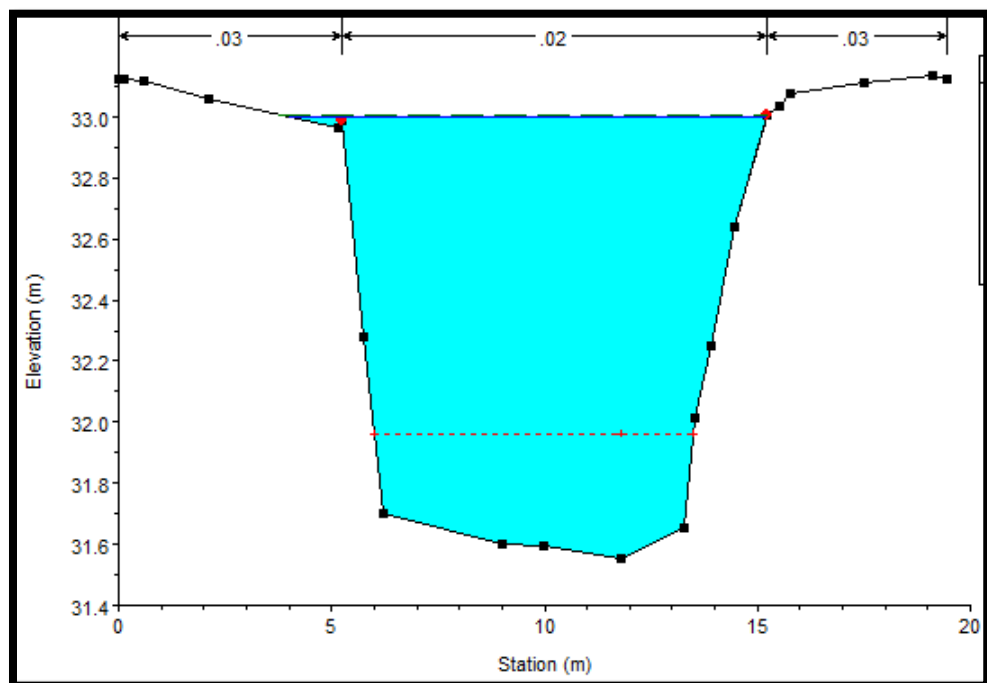
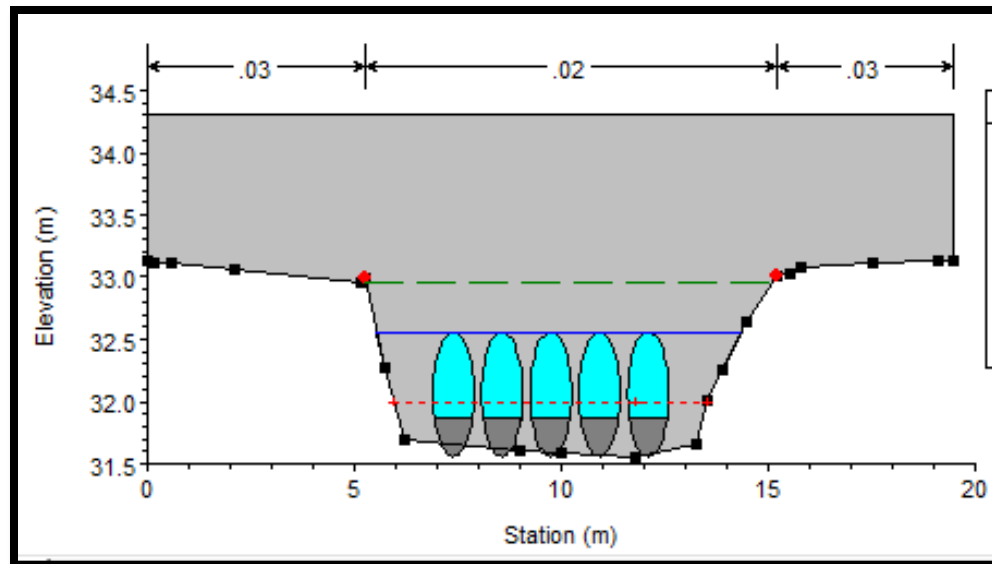
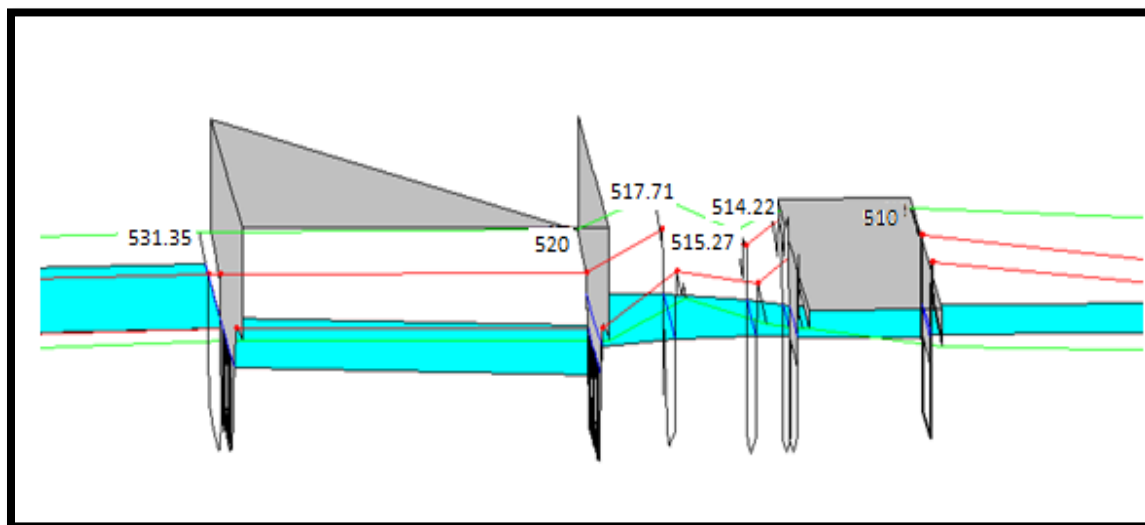


Figura 37. sección transversal 531.35 con desbordamiento lado derecho.



*Figura 38.* puente canal abscisa 531, aumento de lámina de agua debido a descarga teniendo en cuenta la sedimentación dentro de la tubería.



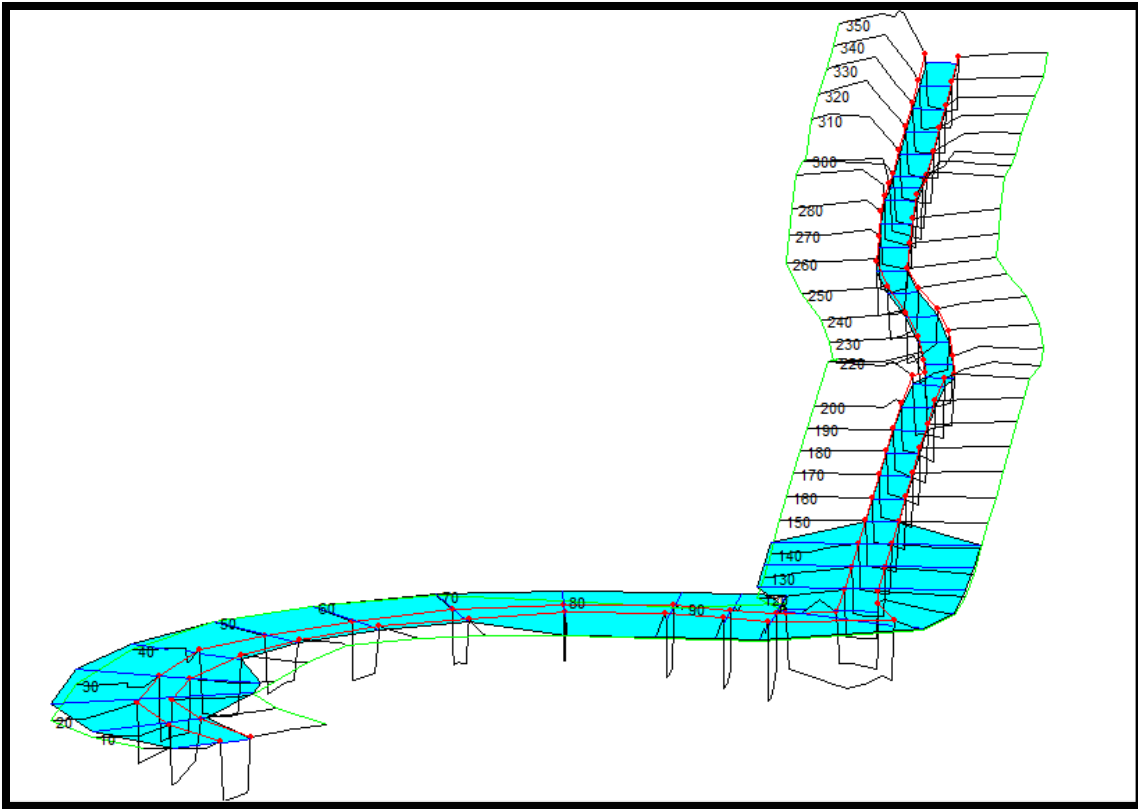
*Figura 39.* puente canal en su máxima capacidad de drenaje, se evidencia subida de lámina de agua por sedimentos en la tubería abscisa 531.35.

**13.2.3 Abscisa 350 a 0 (punto final de modelación). (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo)**

**Tabla 14.**

*Abscisa 350 a 0 (punto final de modelación). (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo)*

<b>Tramo</b>	<b>Volumen de sedimentos (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Desbordamientos</b>	<b>Puntos Críticos</b>
<b>350 a 150</b>	50	no se presentan.	no existen.
<b>150 a 80</b>	72.48	si, ambos lados.	si. ver f.41 y f.42
<b>80 a 40</b>	72.48	si, lado derecho.	si. ver f.43 y f.44
<b>40 a 10</b>	72.48	si, ambos lados.	si. ver f.45 y f.46
<b>10 a 0</b>	72.48	si, lado derecho.	si. ver f.47



*Figura 40.* Tramo del canal apartir de la abscisas K0+350 a K0+000.

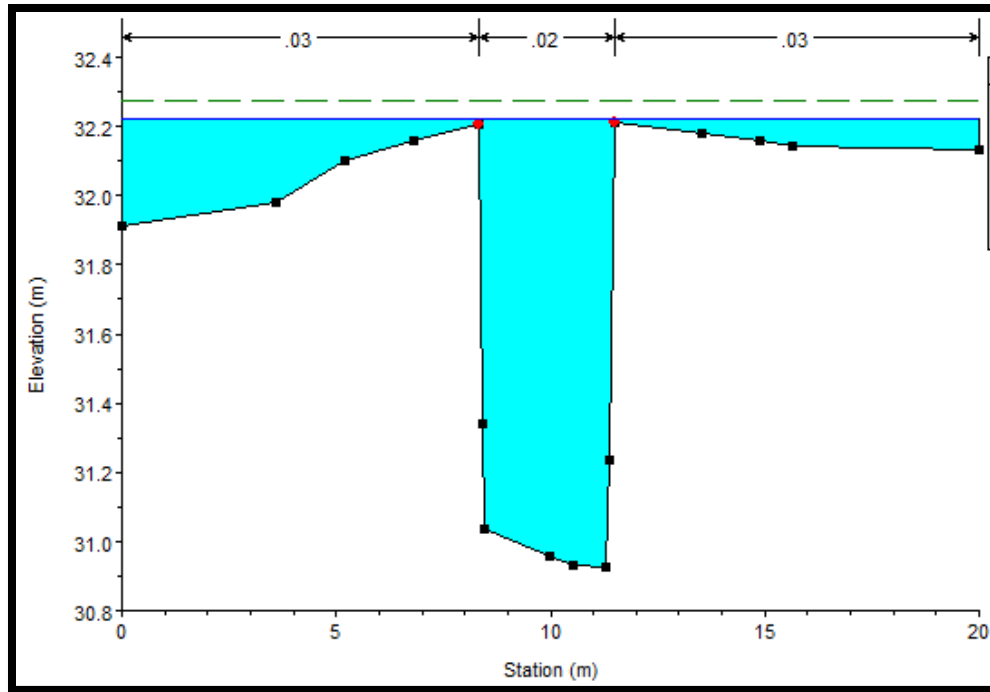


Figura 41. sección transversal K0+140 con desbordamiento, en ambos lados.

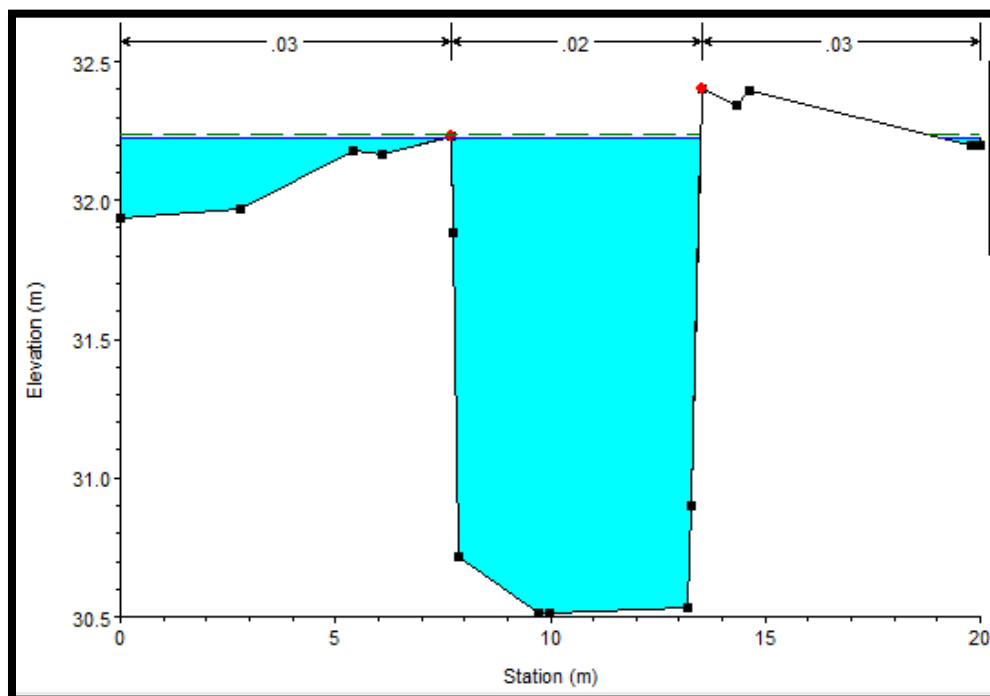


Figura 42. Sección transversal k0+095.68 con desbordamiento, en ambos lados.

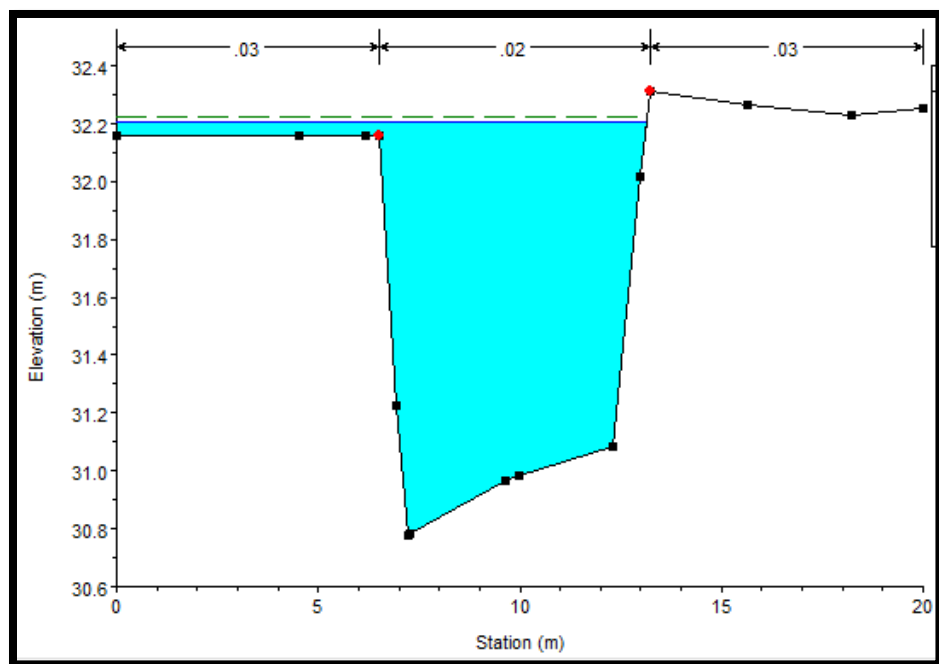


Figura 43. Sección transversal K0+070 con desbordamiento, lado derecho

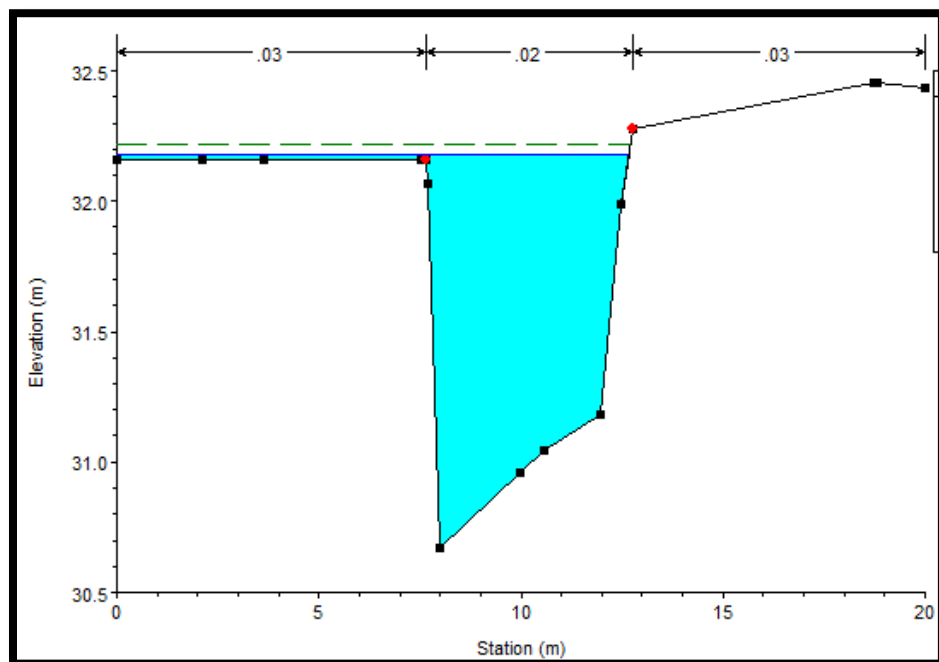


Figura 44. Sección transversal K0+050 con desbordamiento, lado derecho.

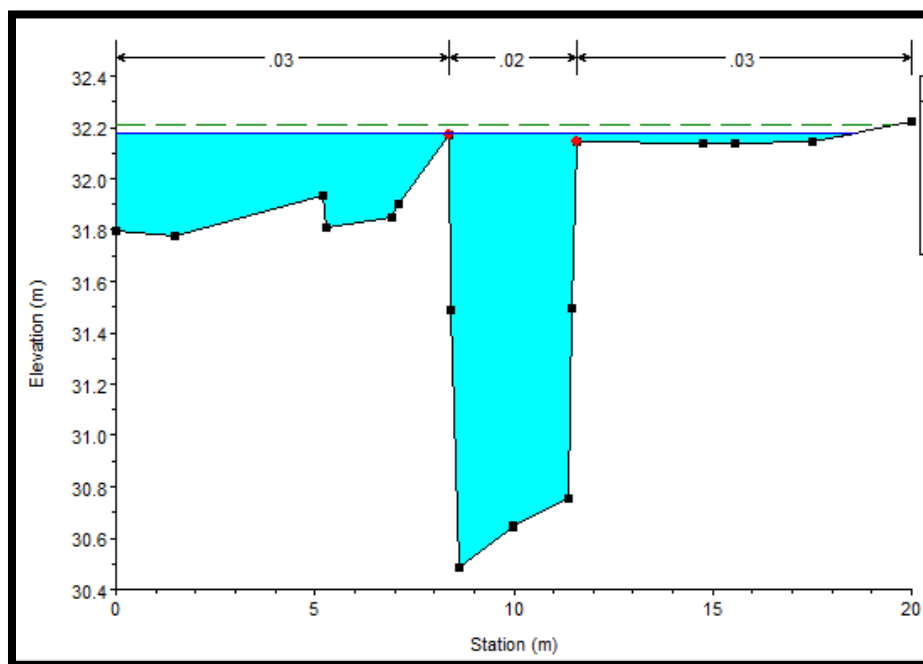


Figura 45. Sección transversal K0+030 con desbordamiento, ambos lados

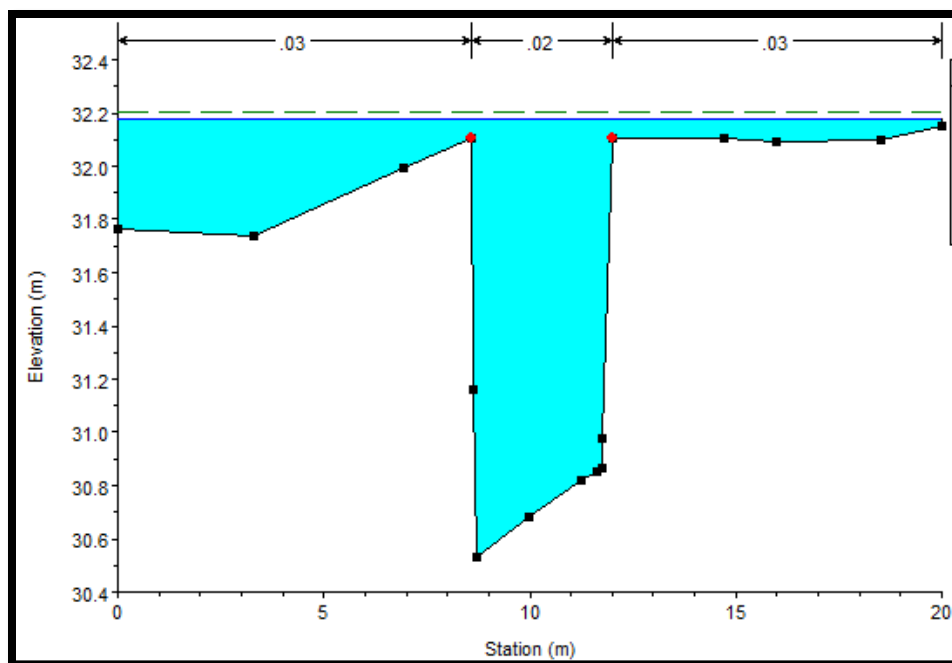


Figura 46. Sección transversal K0+020 con desbordamiento, ambos lados

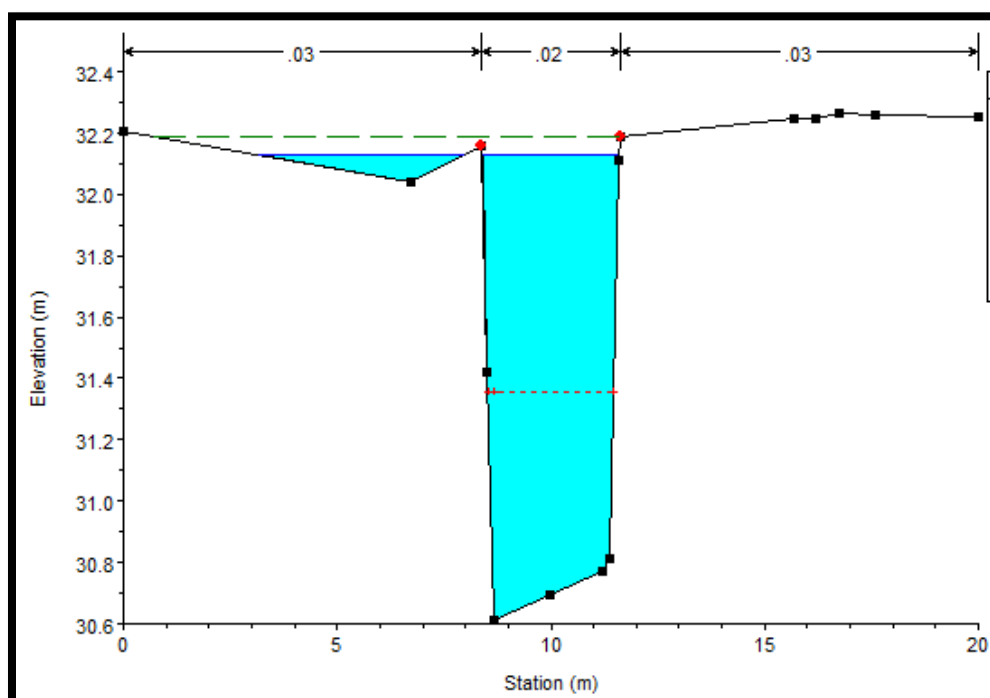


Figura 47. Sección transversal K0+020 con desbordamiento, lado derecho



### 13.3 Escenario 2 (modelación sin sedimentos sin calibrar)

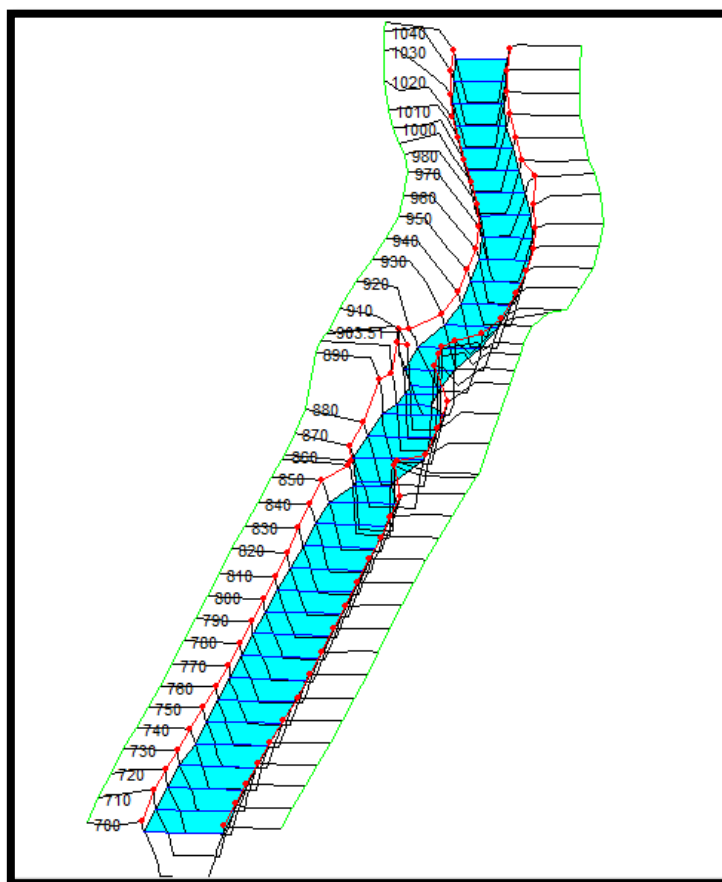
- Esta modelación se desarrolló sin volumen de sedimentos dentro del canal.

#### 13.3.1 Abscisa 1050 a 700. Inicio de la modelación (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo).

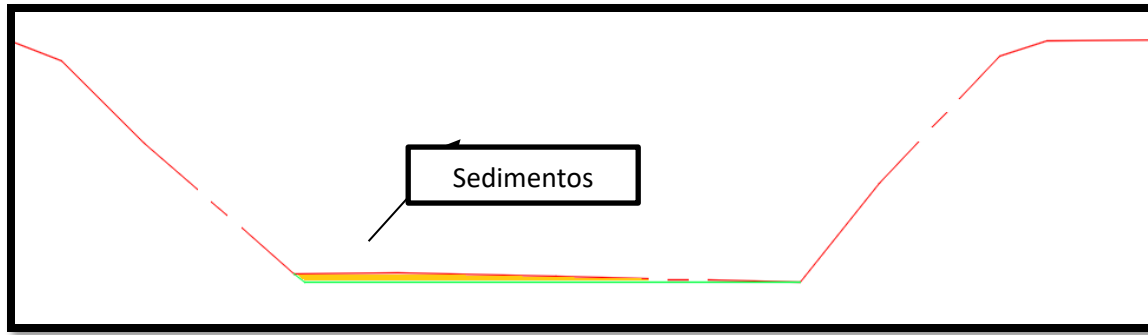
**Tabla 15.**

*Abscisa 1050 a 700. inicio de la modelación (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo).*

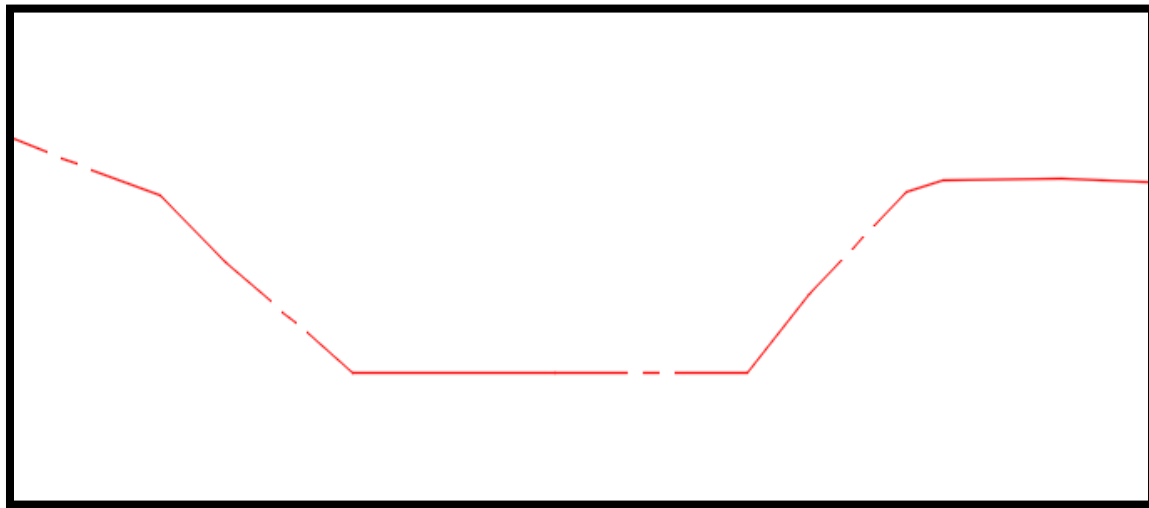
Tramo	Desbordamientos	Puntos críticos
1050 A 700	No se presentan.	No existen. ver F.49, 50, 51 y 52.



*Figura 48.* Tramo del canal entre la abscisa 1050 a 700.



*Figura 49.* Sección transversal 1050 con sedimento.



*Figura 50.* Sección transversal 1050 sin sedimento.

Nota aclaratoria: Este ajuste de la sección transversal se desarrolló para todas las secciones del tramo del canal (abscisa 1050 a 0) para la modelación sin sedimentos.

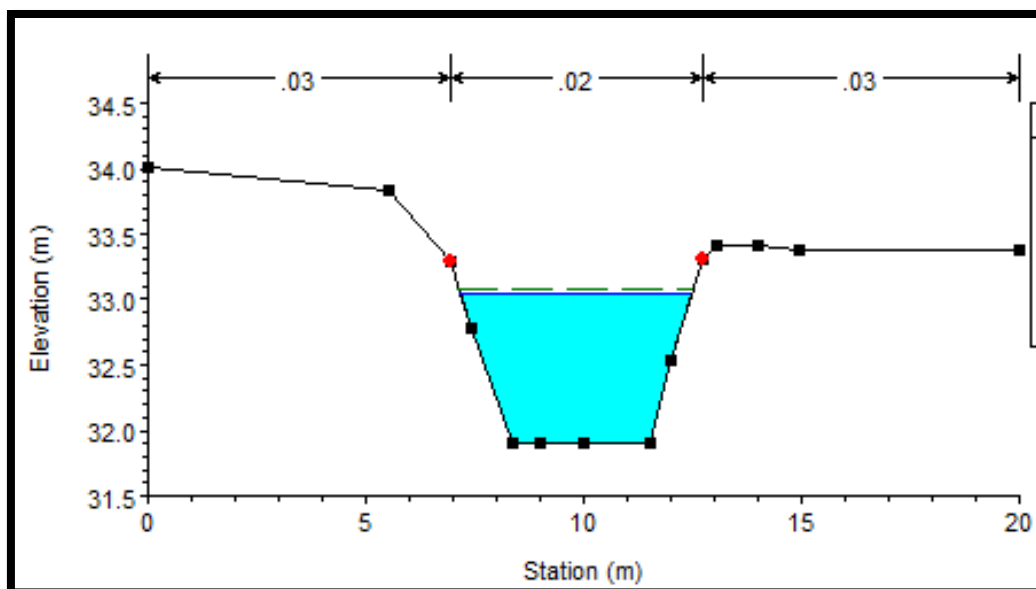


Figura 51. Sección transversal 1050 modelada sin sedimento.

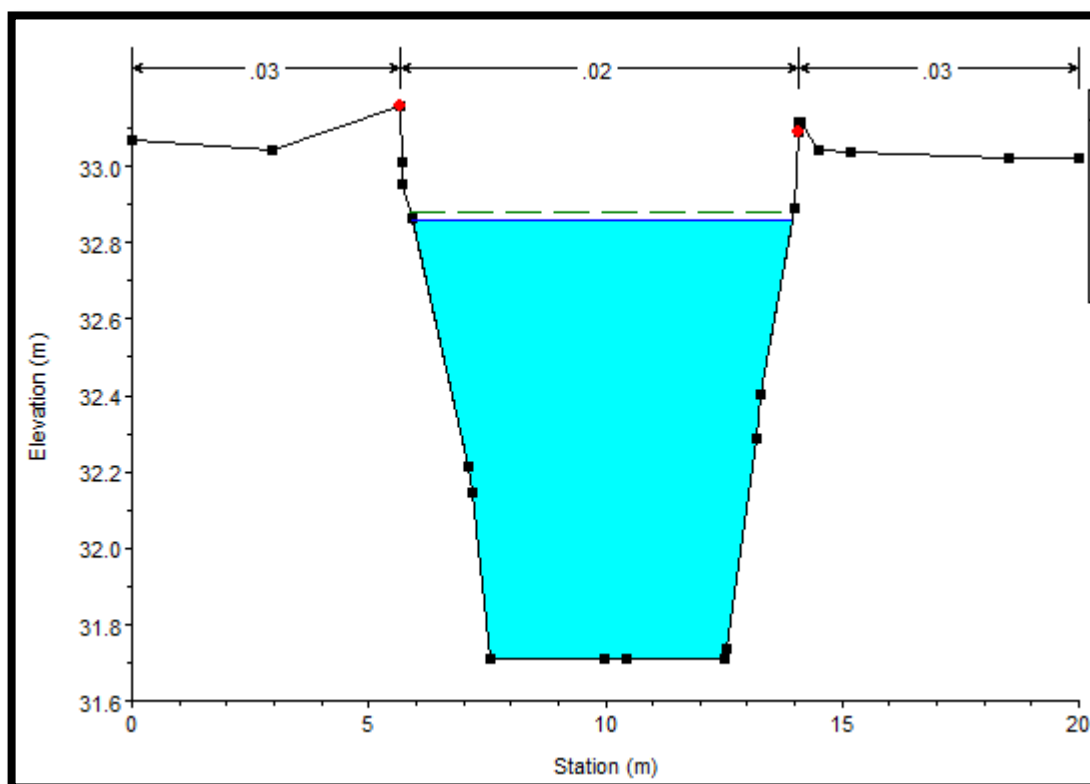


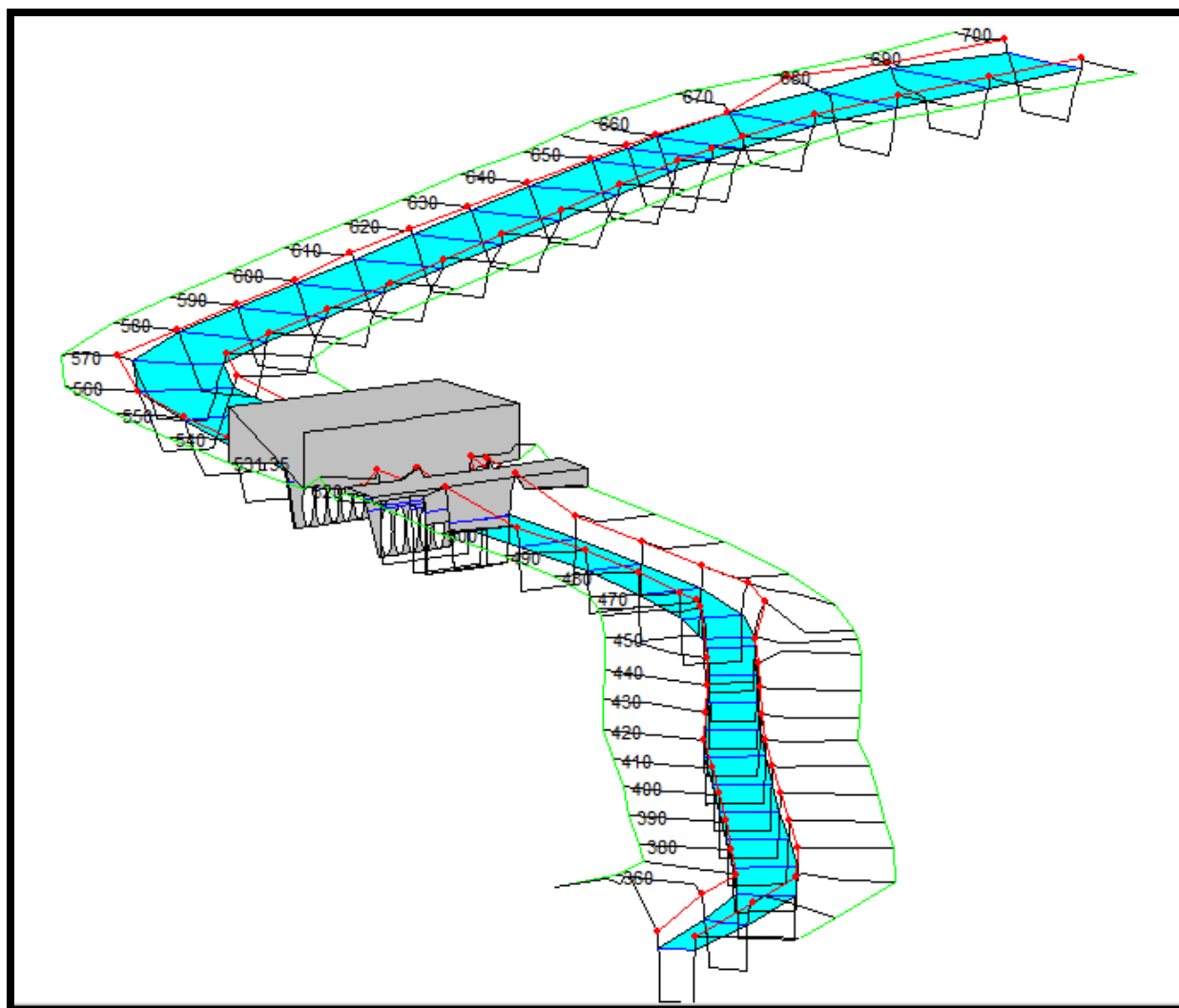
Figura 52. Sección transversal 700 modelada sin sedimento.

### 13.3.2 Abscisa 700 a 350. (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo).

**Tabla 16.**

*Abscisa 700 a 350. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo).*

Tramo	Desbordamientos	Puntos críticos
<b>700 A 350.</b>	No se presentan.	No existen. Ver f. 54,55, 56, 57, 58 y 59.



*Figura 53. Tramo del canal apartir de la abscisas 700 a 350.*

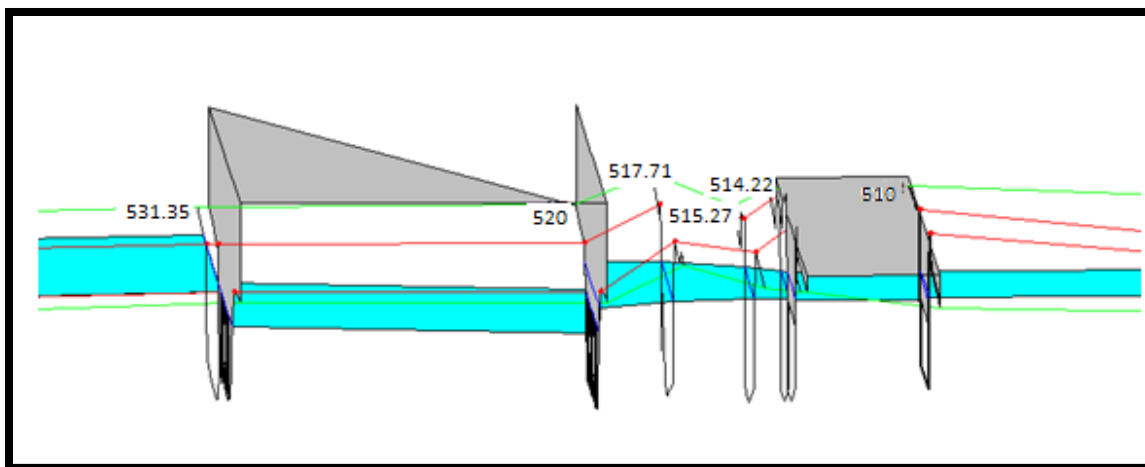


Figura 54. Aumento de lámina de agua en puente canal abscisa 531, no presenta desbordamiento

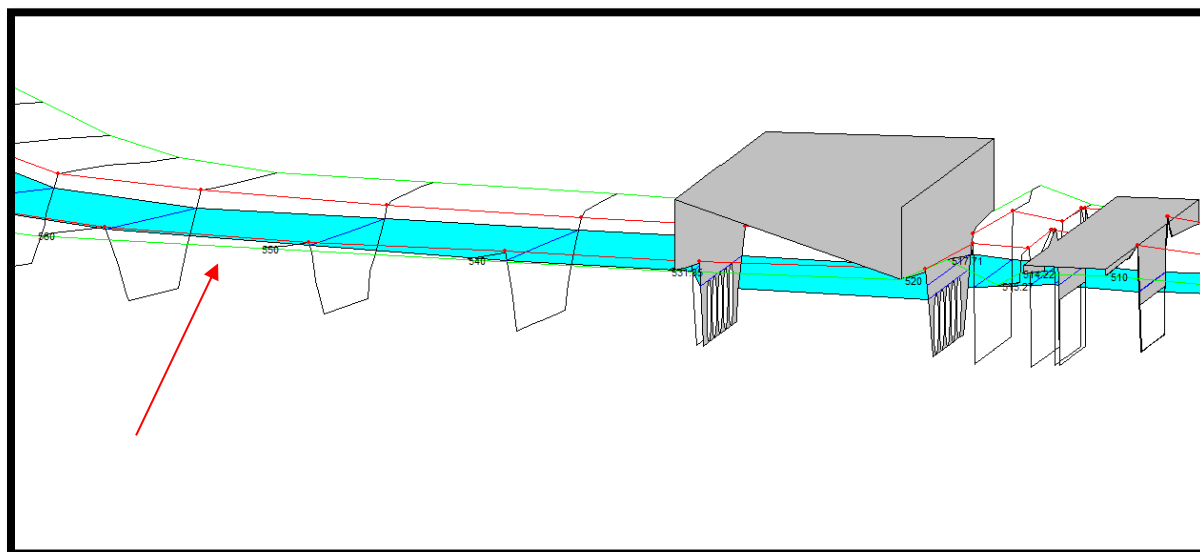


Figura 55. Entre la abscisa 560 a 550 la lámina de agua no presenta borde libre, lo que quiere decir que se encuentra a punto de desbordarse.

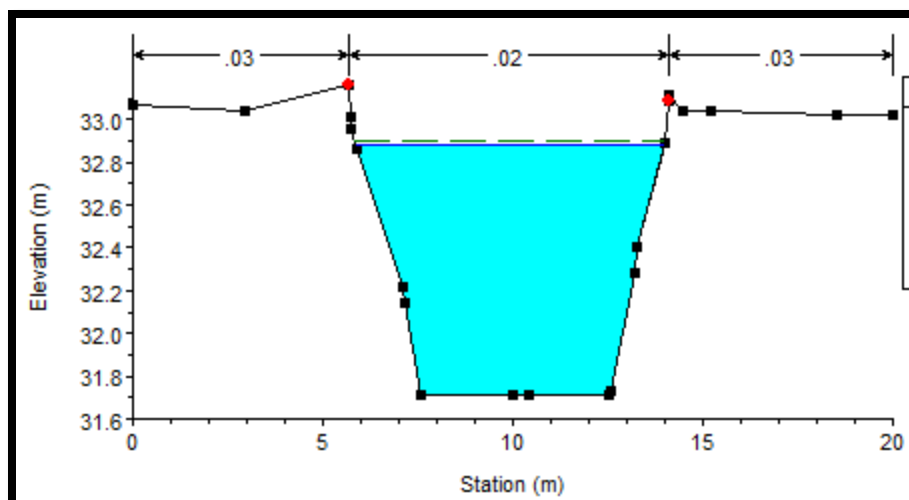


Figura 56. Sección transversal 700 modelada sin sedimento.

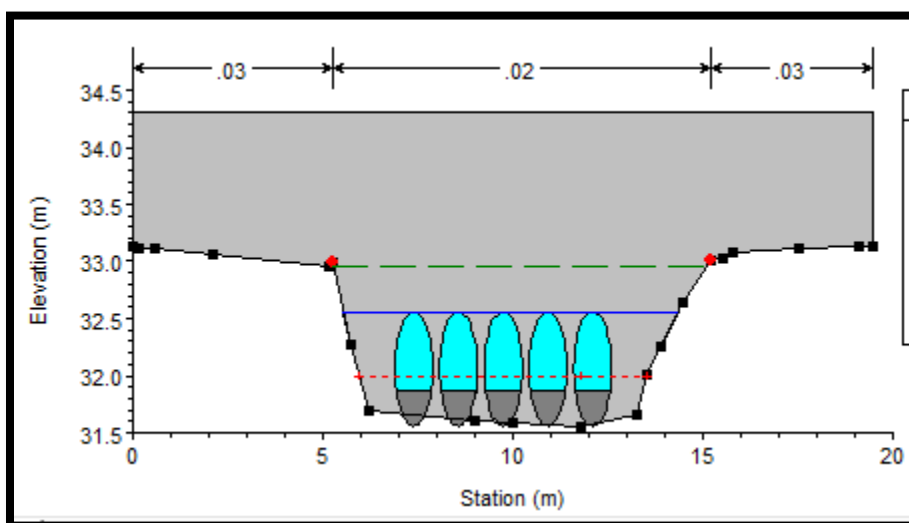


Figura 57. Puente canal con sedimentos abscisa 531.

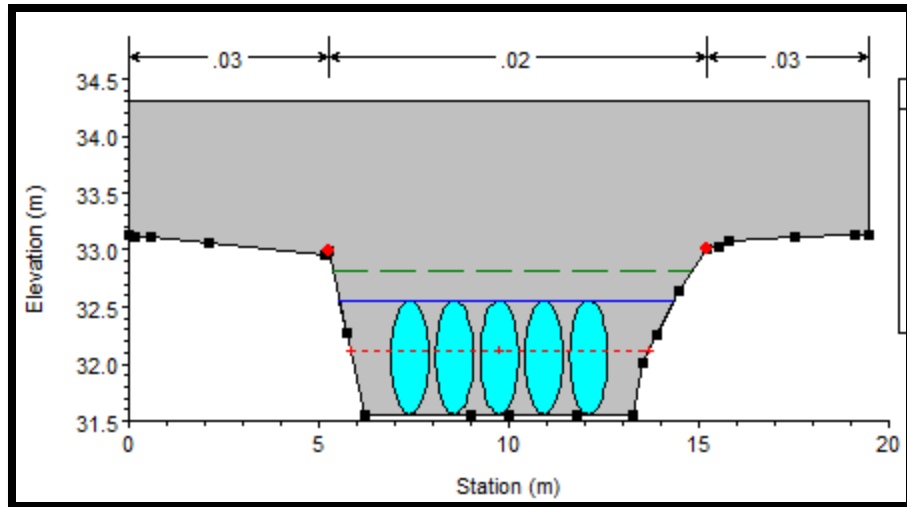


Figura 58. Puente canal sin sedimentos abscisa 531.

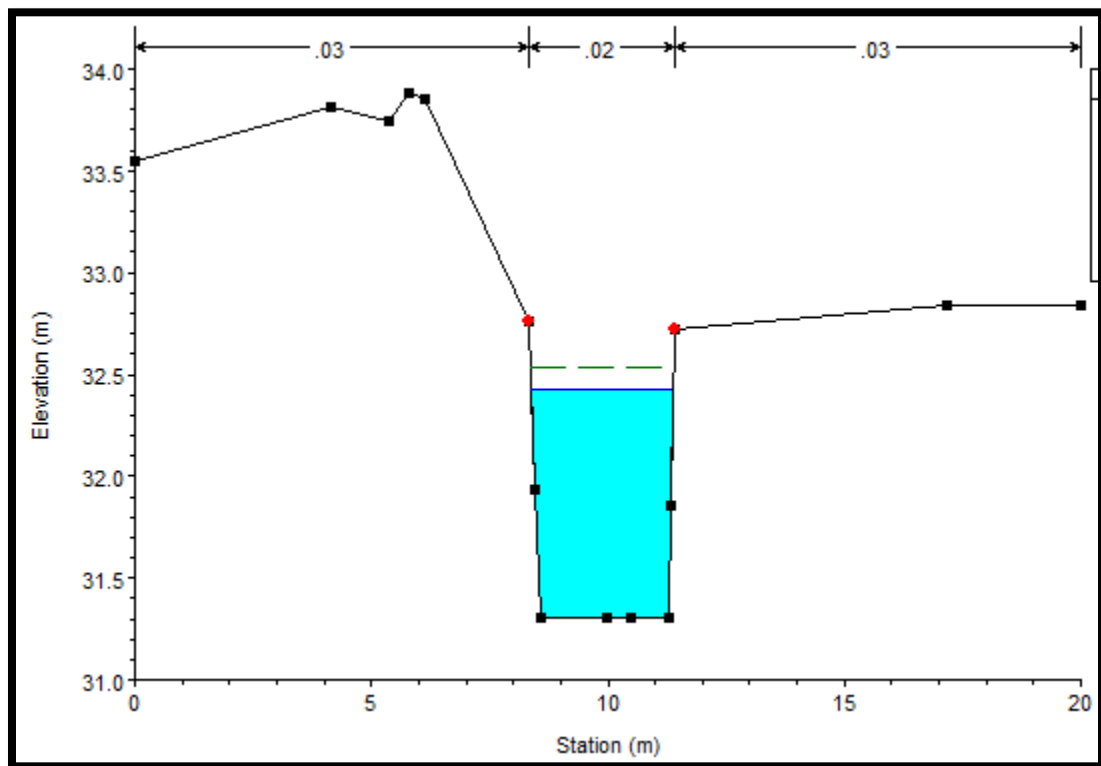


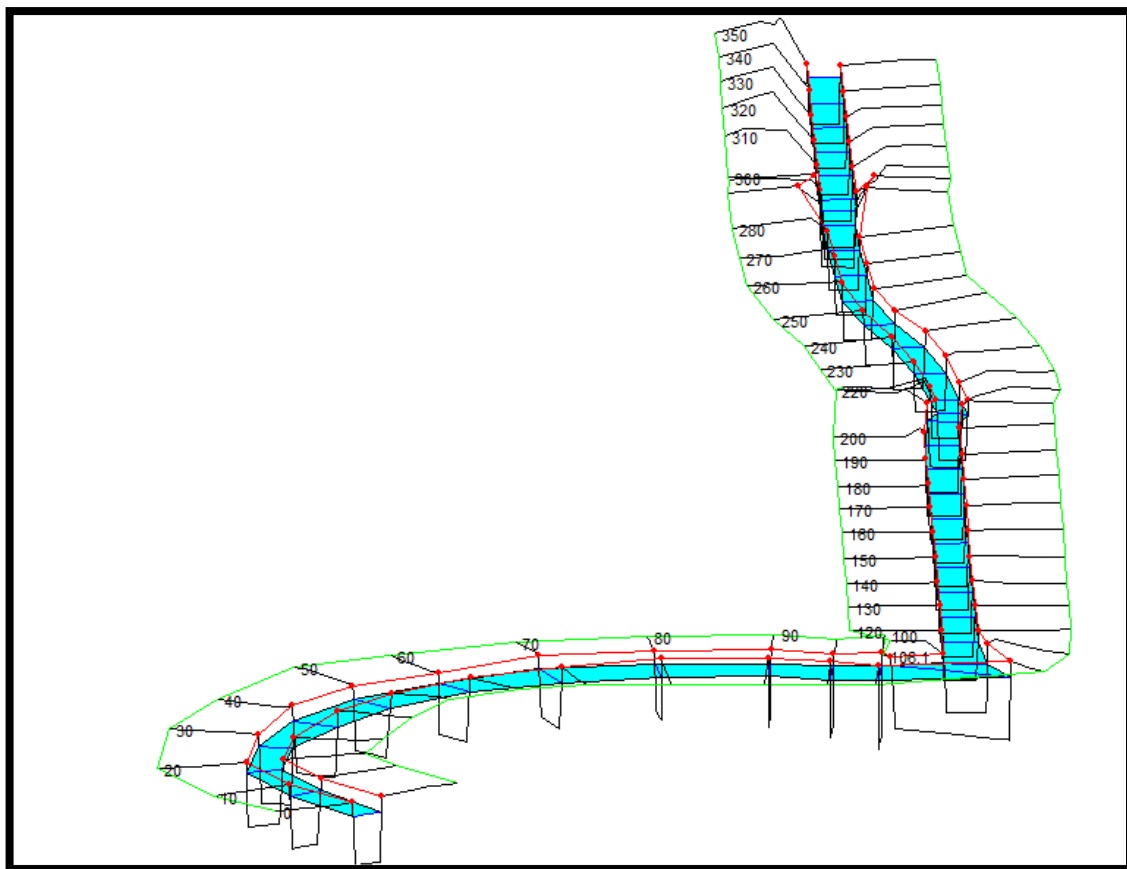
Figura 59. Sección transversal 350 modelada sin sedimento.

**13.3.3 Abscisa 700 a 350 (punto final de modelación).** (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo).

**Tabla 17.**

*Abscisa 350 a 0 (punto final de modelación).* (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo).

Tramo	Desbordamientos	Puntos críticos.
<b>350 a 0.</b>	No se presentan.	No existen. Ver F.61 y 62.



*Figura 60.* Tramo del canal a partir de la abscisas 350 a 0.



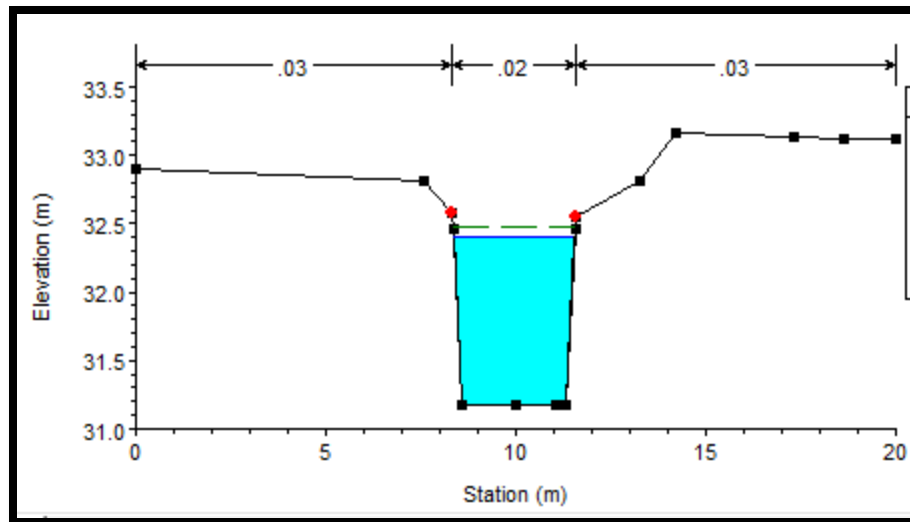


Figura 61. Sección transversal 300 modelada sin sedimento.

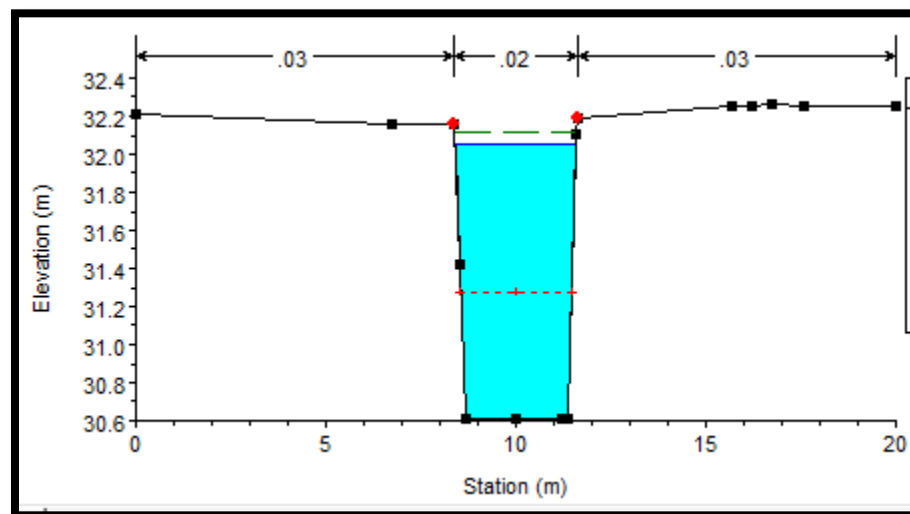


Figura 62. Sección transversal 0 modelada sin sedimento.

Nota aclaratoria: posteriormente a este punto y siguiendo la trayectoria del canal, éste ingresa a unos cultivos de palma africana extendiéndose aproximadamente 4.5 km aguas abajo. Cabe destacar que en la investigación solo se llegó hasta este punto.

**13.4 Escenario 3 (modelación sin sedimentos calibrado).**

Para la calibración del modelo se tomó mediciones en campo en el cual se determinó la altura de la lámina de agua, teniendo en cuenta el caudal de funcionamiento de  $2.6 \text{ m}^3/\text{seg}$ . A continuación, se muestra los resultados obtenidos:

**Tabla 18.**

*Alturas medidas en campo (lámina de agua).*

<b>Sección</b>	<b>Altura y (Medido)</b>
<b>940</b>	0.811
<b>920</b>	0.9324
<b>870</b>	0.92
<b>810</b>	0.82
<b>610</b>	0.79
<b>540</b>	0.67

Luego de tener los datos medidos en campo, se comparan los resultados obtenidos a través de la modelación anterior (Ítem 8.3). La cual, dará una altura de lámina de agua modelada. A continuación se muestran los siguientes resultados obtenidos:

**Tabla 19.**

*Alturas modeladas (Modelo Hec Ras).*

<b>Sección</b>	<b>Y modelado</b>
<b>940</b>	0.75
<b>920</b>	0.77
<b>870</b>	0.91
<b>810</b>	0.86
<b>610</b>	0.82
<b>540</b>	0.86

De la información anterior se hace una gráfica comparativa para determinar que tanto varía o que porcentaje de error existe en el modelo.

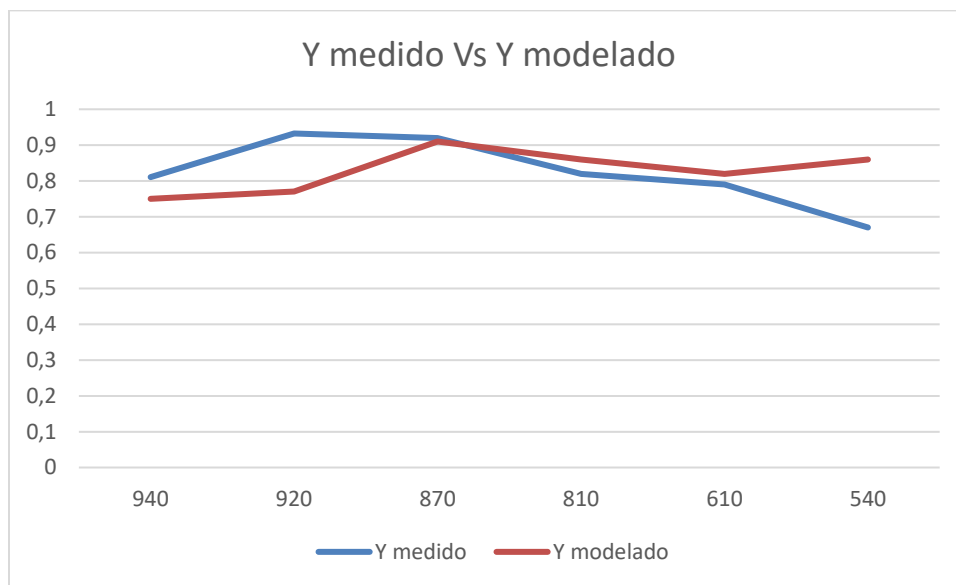


Figura 63. Comparación de Y medido Vs Y modelado.

**Tabla 20.**

*Error porcentual en cada abscisa.*

SECCIONES	Y medido	Y modelado	ERROR %
<b>940</b>	0.811	0.75	8%
<b>920</b>	0.9324	0.77	17%
<b>870</b>	0.92	0.91	1%
<b>810</b>	0.82	0.86	5%
<b>610</b>	0.79	0.82	4%
<b>540</b>	0.67	0.86	22%

Se puede observar que el modelo del escenario 2 (ítem 8.3) presenta errores entre el 1% al 22%, por consiguiente, se debe hacer una calibración del modelo para reducir el margen de error y así poder llegar a un valor permisible. Para ilustrar la rugosidad de la abscisa se usa la

fórmula de Manning para determinar un primer parámetro y así empezar con la calibración del modelo con el software computacional Hec-Ras.

#### 13.4.1 Aplicación de Manning.

**Tabla 21.**

*Tabla de resultados abscisa 940.*

Sección	BASE	TALUD	Y hallado	Q	n supuesto	Error porcentual	Descripción
940	2.89	1.84	0.075	0.46143843	0.0029	90.75%	
940	2.89	1.84	0.15	0.74127693	0.0058	81.50%	
940	2.89	1.84	0.225	0.98513448	0.0087	72.26%	
940	2.89	1.84	0.3	1.21226292	0.0116	63.01%	
940	2.89	1.84	0.375	1.43058706	0.0145	53.76%	
940	2.89	1.84	0.45	1.64427964	0.0174	44.51%	
940	2.89	1.84	0.525	1.85583243	0.0203	35.27%	
940	2.89	1.84	0.6	2.066853	0.0232	26.02%	
940	2.89	1.84	0.675	2.27843415	0.0261	16.77%	
940	2.89	1.84	0.75	2.49134722	0.029	7.52%	
940	2.89	1.84	0.811	2.61246205	0.032	0.00%	Piedra suelta, Mampostería.

Nota aclaratoria: Este procedimiento se desarrolla para todas las abscisas medidas.

A continuación se muestran los siguientes resultados:

**Tabla 22.***Resultados obtenidos en las abscisas.*

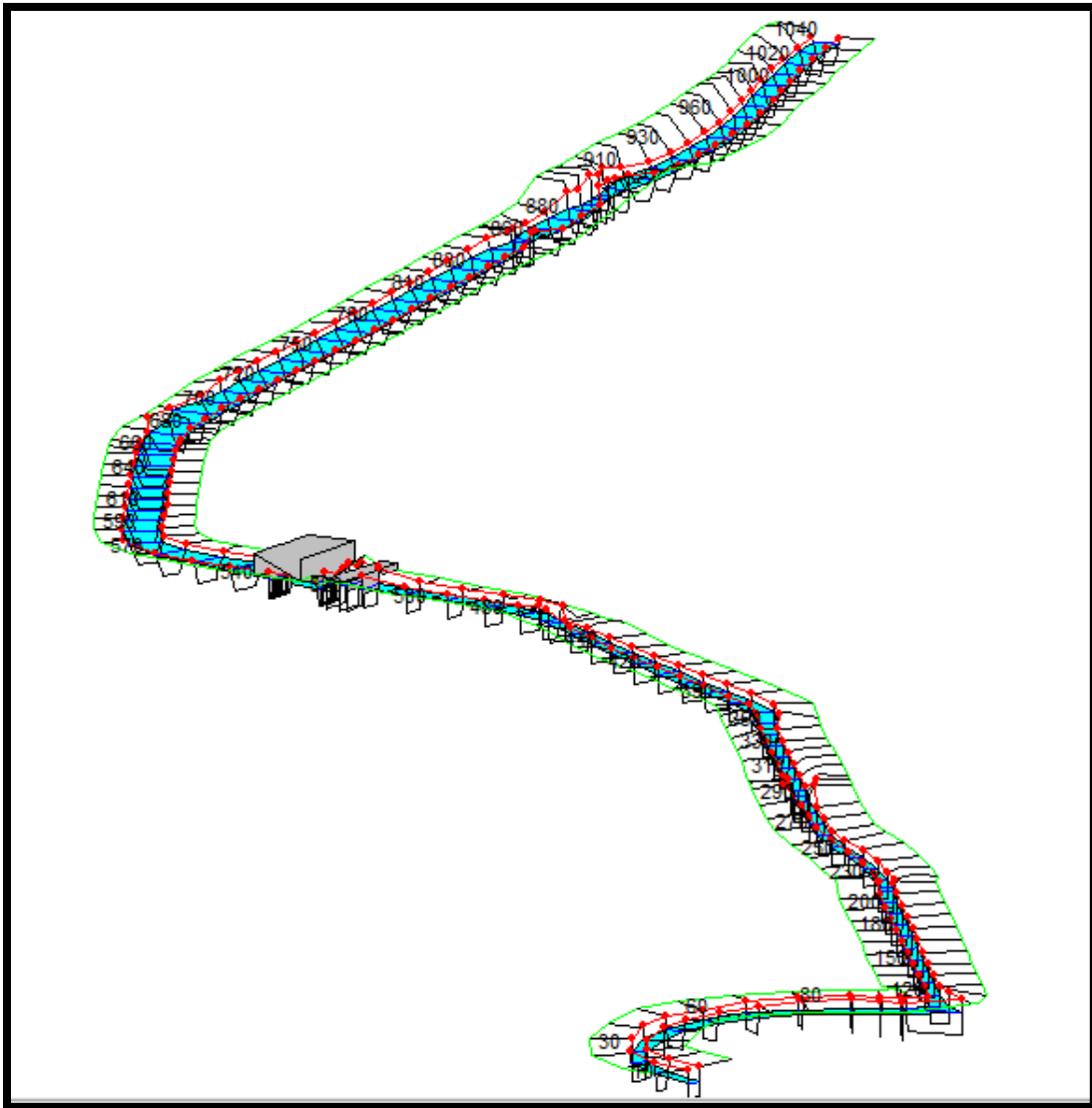
<b>Sección</b>	<b>Y</b>	<b>Q</b>	<b>n supuesto</b>	<b>Descripción</b>
<b>940</b>	0.811	2.61246205	0.032	Piedra suelta, Mampostería.
<b>920</b>	0.9324	2.6114819	0.04	Malezas densas, En tierra serpenteante y lento.
<b>870</b>	0.92	2.6038167	0.06	Meandros con muchas piedras pozos y bancos.
<b>810</b>	0.82	2.61681169	0.055	Meandros con pendientes bajas y sección ineficiente.
<b>610</b>	0.79	2.62367993	0.043	Cortes en rocas afilados e irregulares.
<b>540</b>	0.67	2.614782	0.046	Cortes en rocas afilados e irregulares.

Luego de obtener los diferentes números de manning se promedian y se halla un número de Manning entre la abscisa 1050 a 900, después entre la 900 a 650 y por último la 650 a 0. A continuación se muestran los manning obtenidos.

**Tabla 23.***Mannings para tramos a modelar.*

<b>Abscisas.</b>	<b>N. Promedio.</b>
<b>1050 -900</b>	0.036
<b>900 - 650</b>	0.0575
<b>650 - 0</b>	0.0445

Seguidamente se hace la modelación en el software Hec-Ras, para ver los resultados obtenidos.



*Figura 64.* Resultado de calibración con el Q. funcionamiento.

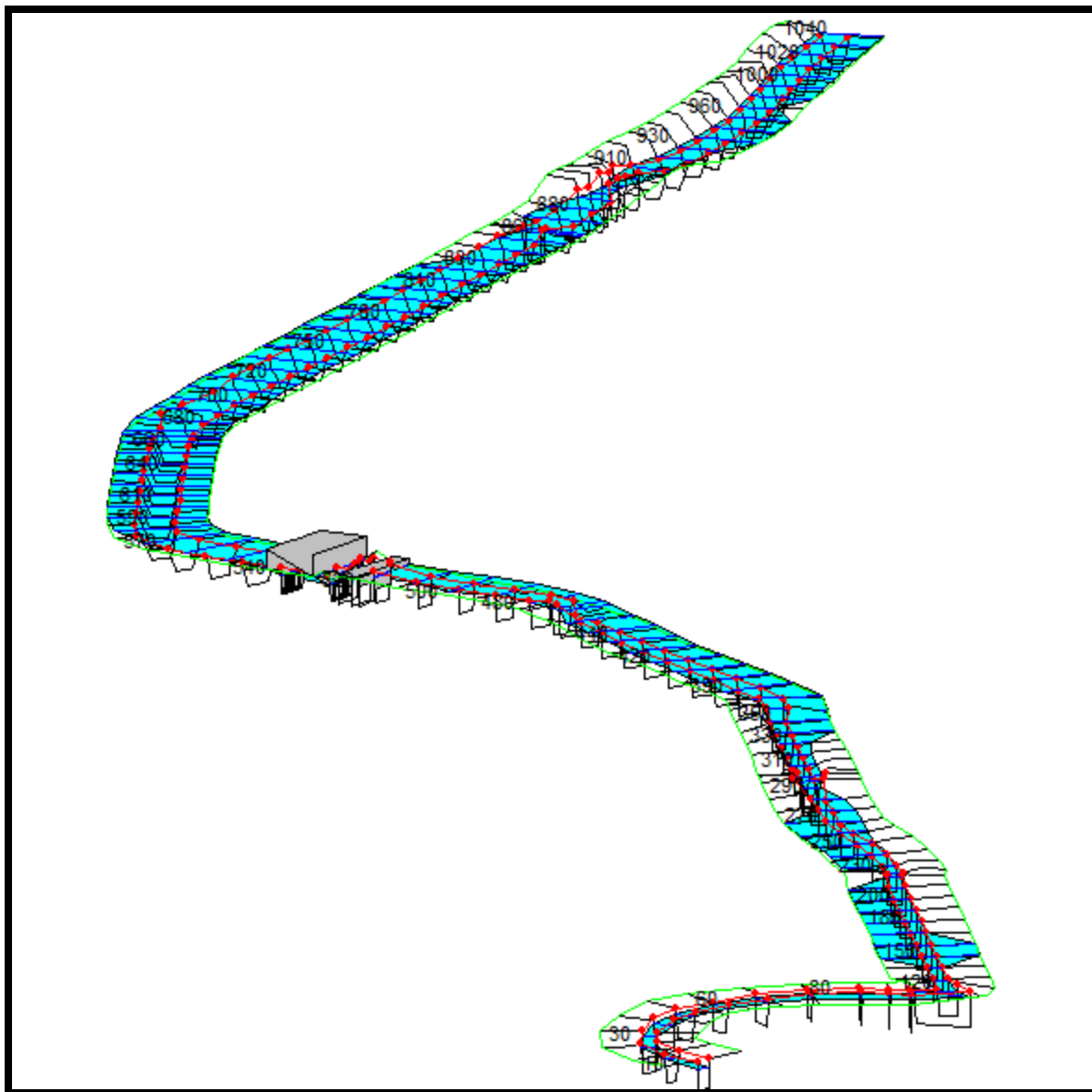


Figura 65. Resultado de calibración con el Q. funcionamiento + Q. Hidrología.

**Tabla 24.***Resultados obtenidos de calibración #1.*

Abscisas	Y modelado	Y medido	Error %	N (Manning)
<b>940</b>	1.14	0.811	28.86%	0.036
<b>920</b>	1.16	0.9324	19.62%	
<b>870</b>	1.28	0.92	28.13%	0.0575
<b>810</b>	1.21	0.82	32.23%	
<b>610</b>	1.11	0.79	28.83%	0.0445
<b>540</b>	1.14	0.67	41.23%	

Nota aclaratoria: Este procedimiento se realiza hasta que el error porcentual reduzca gradualmente a un valor permisible de manning.



**Tabla 25.***Resultados obtenidos de calibración.*

<b>N°#</b>	<b>CALIBRACIÓN</b>				
<b>2</b>	<b>Abscisas</b>	<b>Y modelado</b>	<b>Y medido</b>	<b>Error %</b>	<b>N (Manning)</b>
	940	1.06	0.811	23%	0.025
	920	1.09	0.9324	14%	
	870	1.21	0.92	24%	0.05
	810	1.14	0.82	28%	0.04
	610	1.04	0.79	24%	
	540	1.08	0.67	38%	
<b>3</b>	<b>Abscisas</b>	<b>Y modelado</b>	<b>Y medido</b>	<b>Error %</b>	<b>N (Manning)</b>
	940	0.92	0.811	12%	0.02
	920	0.95	0.9324	2%	0.04
	870	1.07	0.92	14%	
	810	1	0.82	18%	
	610	0.89	0.79	11%	0.03
	540	0.93	0.67	28%	0.017
<b>4</b>	<b>Abscisas</b>	<b>Y modelado</b>	<b>Y medido</b>	<b>Error %</b>	
	940	0.77	0.811	5%	
	920	0.8	0.9324	17%	
	870	0.93	0.92	1%	0.03
	810	0.86	0.82	5%	0.02
	610	0.74	0.79	7%	
	540	0.79	0.67	15%	

**Tabla 26.***Resultados obtenidos de calibración.*

<b>N°#</b>	<b>CALIBRACIÓN</b>				
<b>5</b>	<b>Abscisas</b>	<b>Y modelado</b>	<b>Y medido</b>	<b>Error %</b>	<b>N (Manning)</b>
	940	0.79	0.811	3%	0.0179
	920	0.82	0.9324	14%	
	870	0.95	0.92	3%	0.0305
	810	0.88	0.82	7%	
	610	0.77	0.79	3%	0.022
	540	0.81	0.67	17%	
<b>6</b>	<b>Abscisas</b>	<b>Y modelado</b>	<b>Y medido</b>	<b>Error %</b>	<b>N (Manning)</b>
	940	0.79	0.811	3%	0.0185
	920	0.82	0.9324	14%	
	870	0.95	0.92	3%	0.029
	810	0.88	0.82	7%	
	610	0.79	0.79	0%	0.023
	540	0.83	0.67	19%	
<b>7</b>	<b>Abscisas</b>	<b>Y modelado</b>	<b>Y medido</b>	<b>Error %</b>	<b>N (Manning)</b>
	940	0.79	0.811	3%	0.0185
	920	0.82	0.9324	14%	
	870	0.95	0.92	3%	0.029
	810	0.88	0.82	7%	
	610	0.79	0.79	0%	0.023
	540	0.83	0.67	19%	
<b>8</b>	<b>Abscisas</b>	<b>Y modelado</b>	<b>Y medido</b>	<b>Error %</b>	<b>N (Manning)</b>
	940	0.73	0.811	11%	0.0185
	920	0.76	0.9324	23%	
	870	0.88	0.92	5%	0.029
	810	0.8	0.82	3%	
	610	0.62	0.79	27%	0.023
	540	0.68	0.67	1%	

**Tabla 27.***Resultados obtenidos de calibración.*

<b>N°#</b>	<b>CALIBRACIÓN</b>				
<b>9</b>	<b>Abscisas</b>	<b>Y modelado</b>	<b>Y medido</b>	<b>Error %</b>	<b>N (Manning)</b>
	940	0.8	0.811	1.37%	0.01925
	920	0.94	0.9324	0.81%	
	870	0.97	0.92	5.15%	0.0298
	810	0.8	0.82	2.50%	
	610	0.78	0.79	1.28%	0.023
	540	0.68	0.67	1.47%	
<b>10</b>	<b>Abscisas</b>	<b>Y modelado</b>	<b>Y medido</b>	<b>Error %</b>	<b>N (Manning)</b>
	940	0.8	0.811	1.37%	0.05
	920	0.89	0.9324	4.76%	
	870	0.95	0.92	3.16%	0.027
	810	0.79	0.82	3.80%	
	610	0.79	0.79	0%	0.011
	540	0.69	0.67	2.90%	

De las calibraciones #9 y #10 se llegaron a errores porcentuales mínimos, por lo tanto, en la calibración número 9 se observa que los errores porcentuales son muy bajos; pero a la hora de identificar el material se dificulta. Es por eso que la modelación número 10 tiene valores permisibles y se facilita identificar el material fácilmente. A continuación, se muestra el resultado de la calibración con el número de manning de la calibración número 10, el cual, muestra los siguientes materiales:

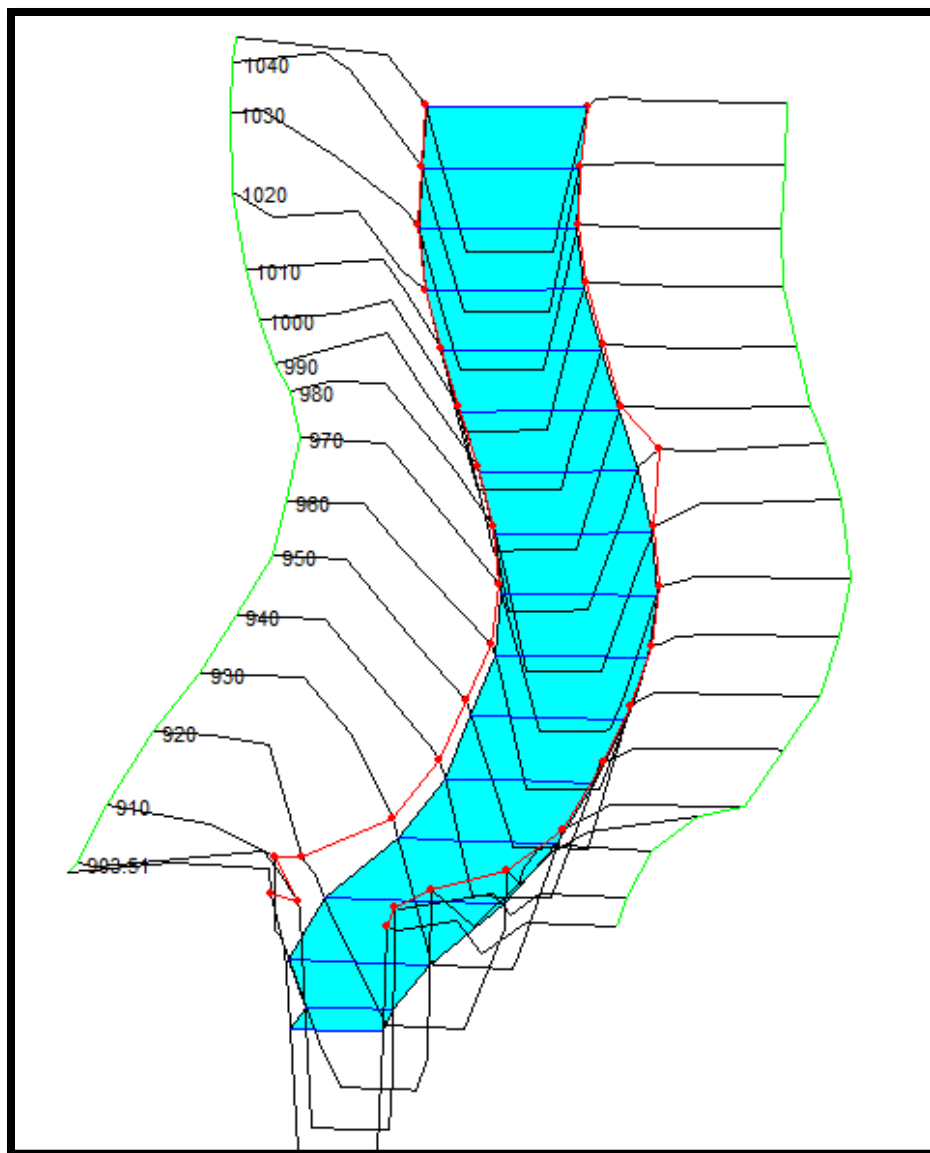
**Tabla 28.***Descripción de Manning en los tramos.*

Abscisas	N (Manning)	Descripción
<b>1050 -900</b>	0.05	Canales sin mantenimiento, malezas y matorrales.
<b>900 - 650</b>	0.027	Mampostería sobre roca cementada.
<b>650 - 0</b>	0.011	Cemento superficie pulida

**13.4.2 Abscisa 1050 a 900. Inicio de la modelación (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo). Calibrado.**

**Tabla 29.***Abscisa 1050 a 700. Inicio de la modelación (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo).*

Tramo	Desbordamientos	Puntos críticos
<b>1050 A 900</b>	No se presentan.	No existen. ver F.67 y 68.



*Figura 66.* Resultado de calibración con el Q. funcionamiento + Q. Hidrología, abscisas 1050 a 900.

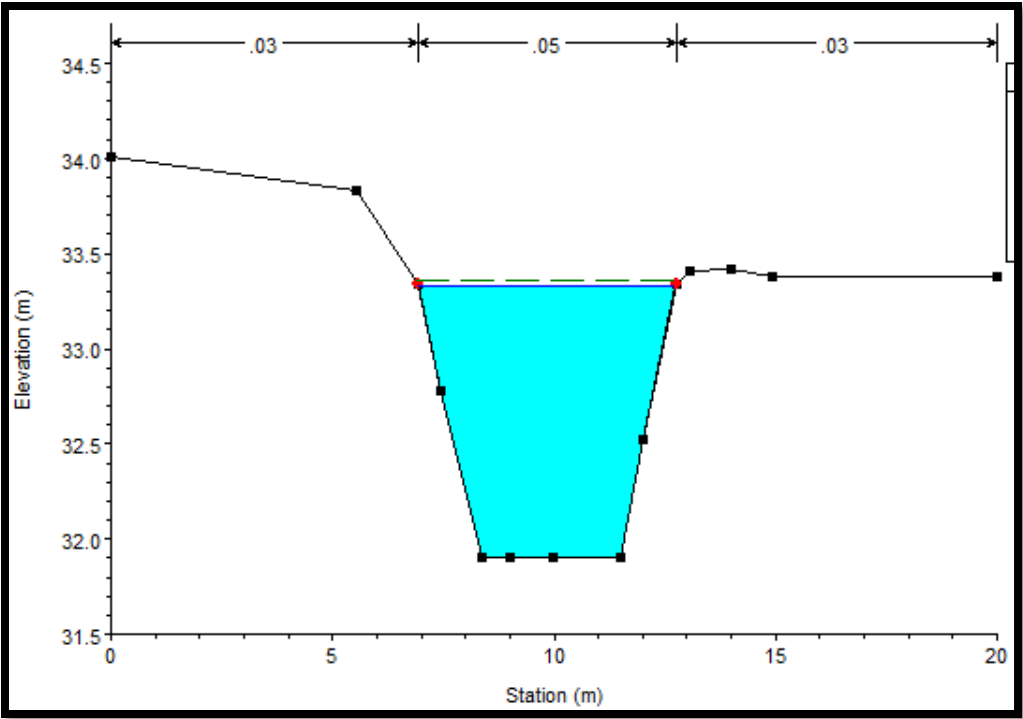


Figura 67. Sección transversal 1050 calibrado.

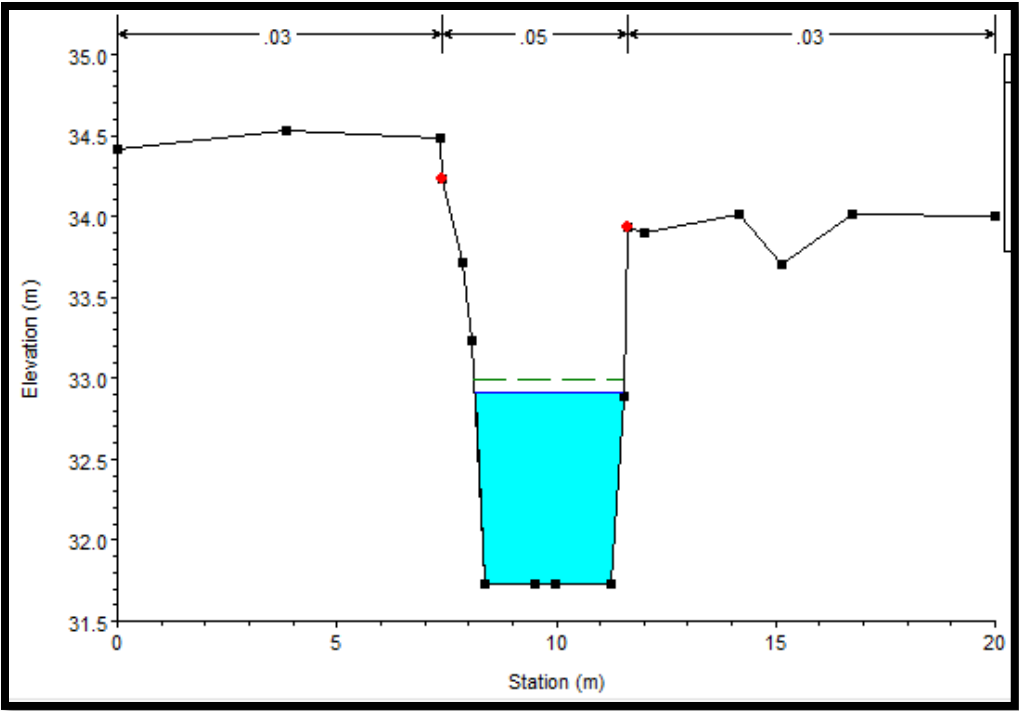


Figura 68. Sección transversal 900 calibrado.

13.4.3 Abscisa 900 a 650. (Sentido de aguas arriba hacia aguas abajo). Calibrado.

Tabla 30.

Abscisa 900 a 650. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo).

Tramo	Desbordamientos	Puntos críticos
900 A 650	No se presentan.	No existen. ver F.70 y 71.

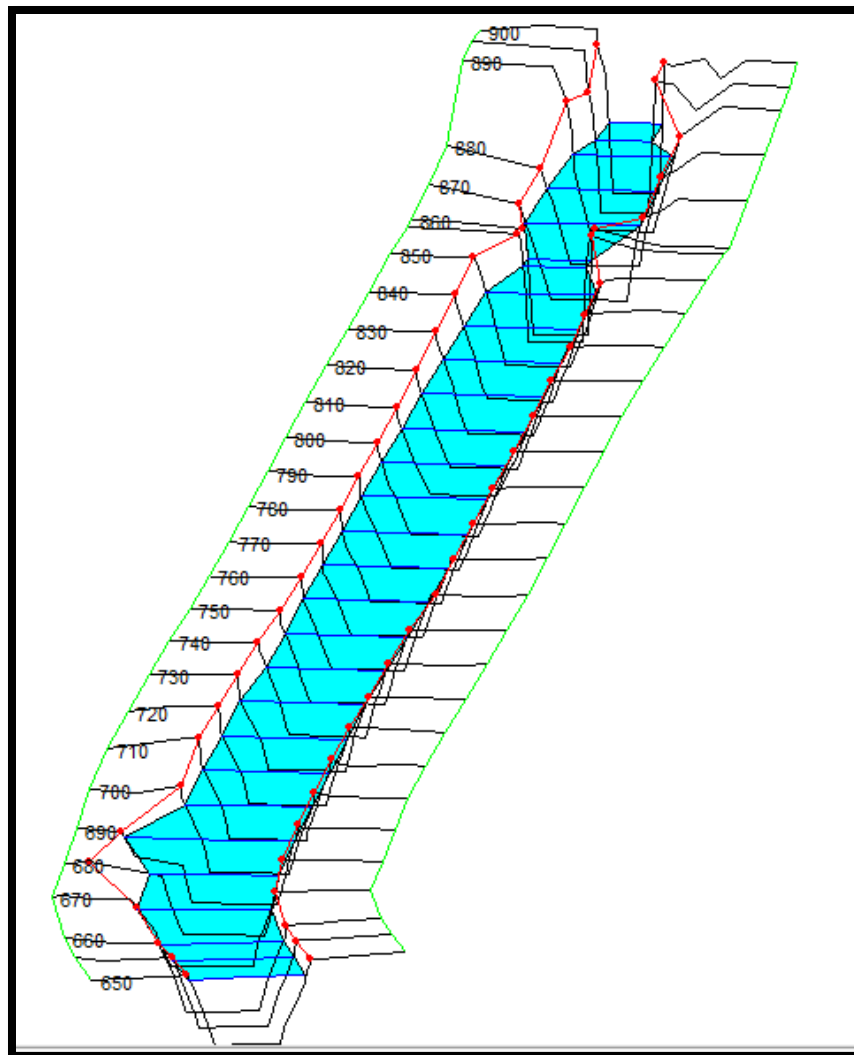


Figura 69. Resultado de calibración con el Q. funcionamiento + Q. Hidrología, abscisas 900 a 650.



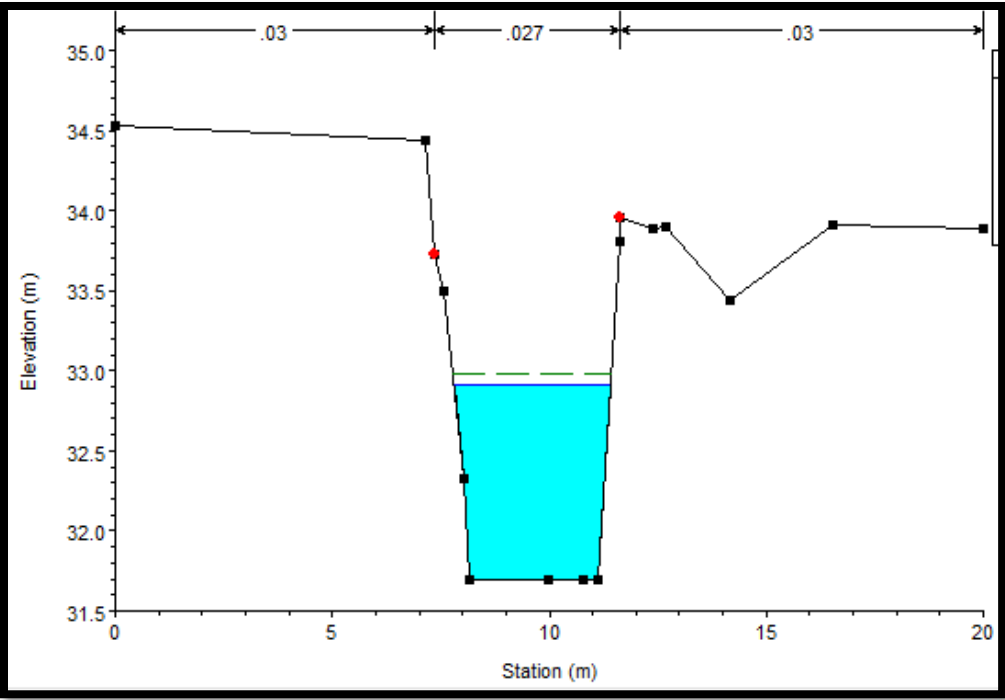


Figura 70. Sección transversal 894.84 calibrado.

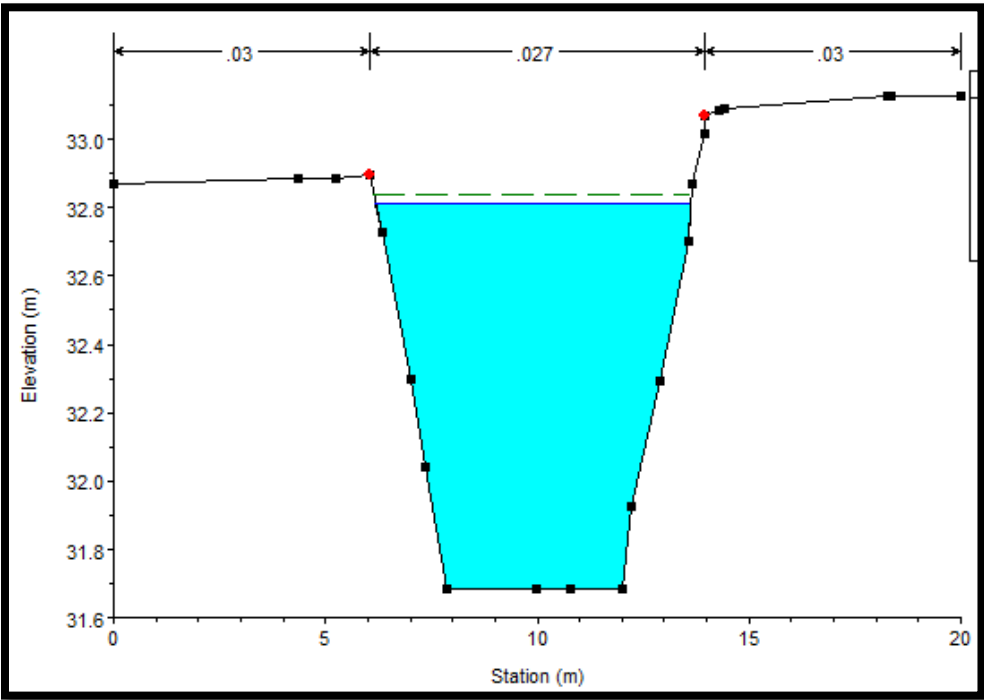


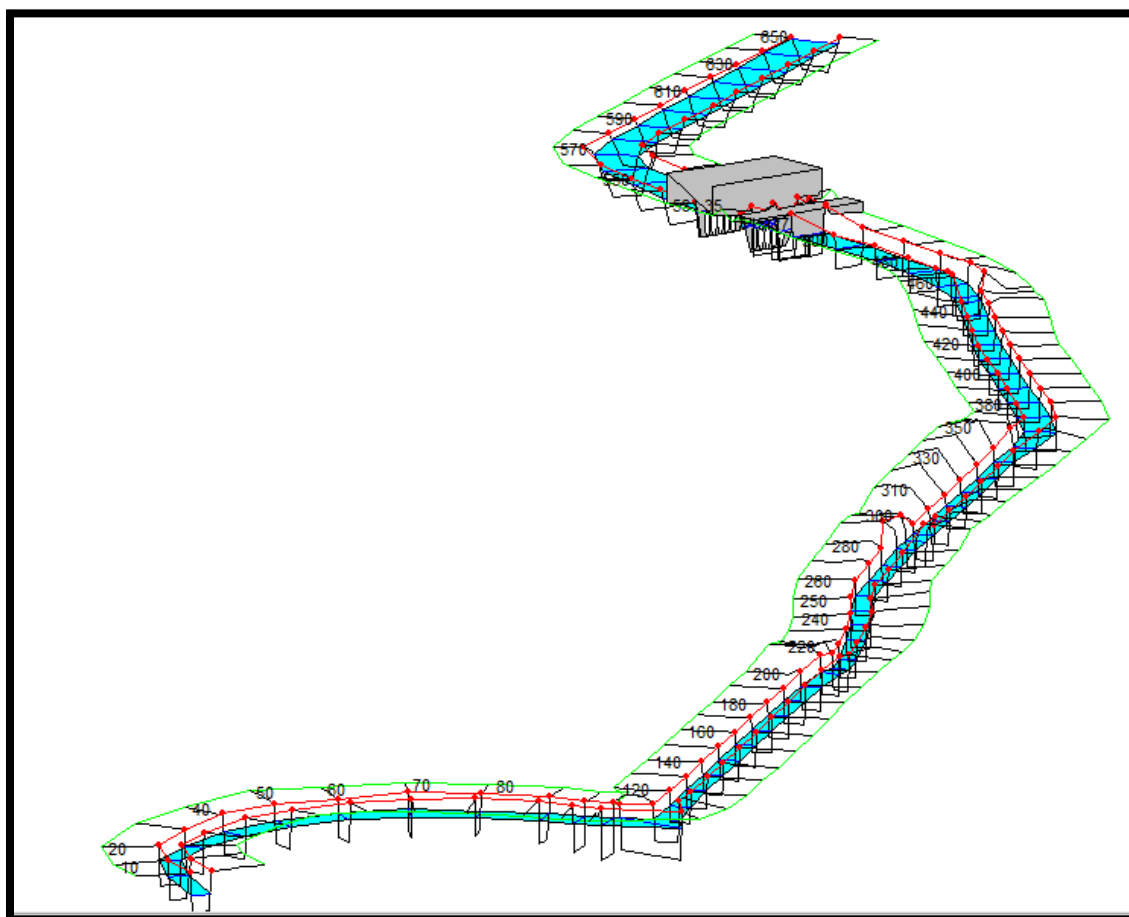
Figura 71. Sección transversal 650 calibrado.

**13.4.4 Abscisa 650 a 0. (Punto final de modelación). (Sentido de aguas arriba hacia aguas abajo). Calibrado.**

**Tabla 31.**

*Abscisa 650 a 0. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo).*

Tramo	Desbordamientos	Puntos críticos
<b>650 A 0</b>	No se presentan.	No existen. ver F.73 y 74.



*Figura 72. Resultado de calibración con el Q. funcionamiento + Q. Hidrología, abscisas 900 a 650.*

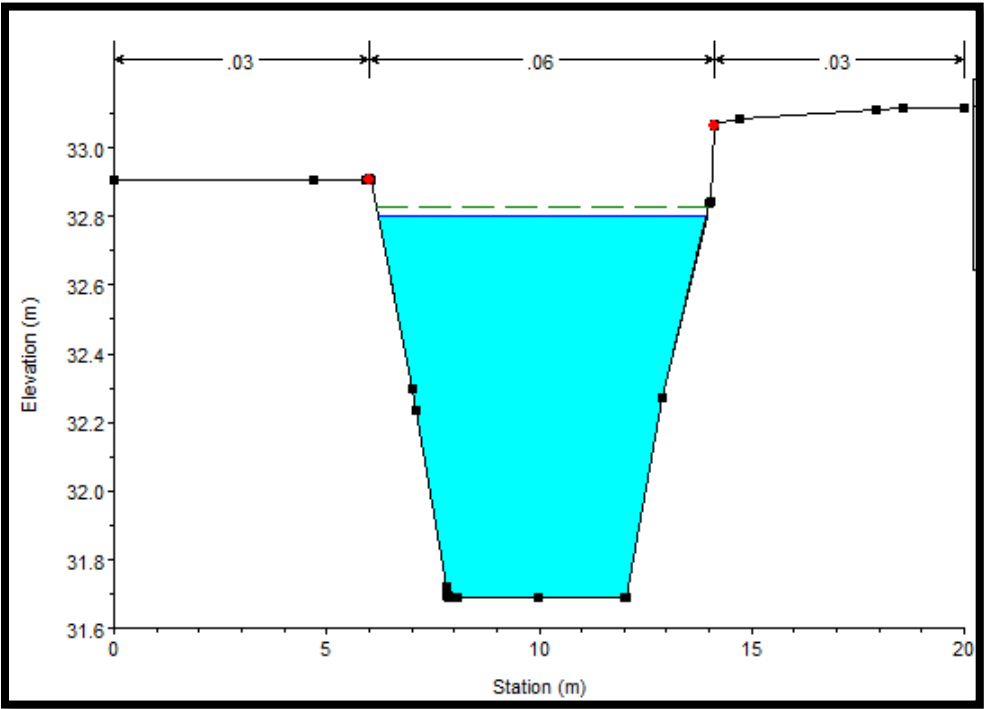


Figura 73. Sección transversal 640 calibrado.

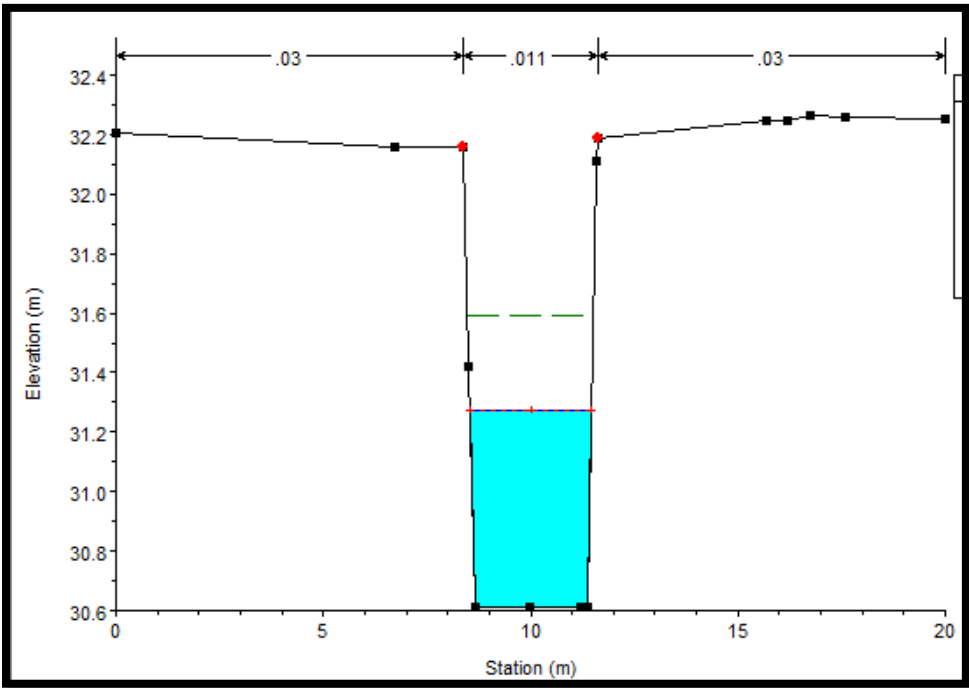


Figura 74. Sección transversal 0 calibrado.

**13.5 Escenario 4 (modelación con sedimentos calibrado)**

Recapitulando en el ítem (8.3.2.1), se hace el mismo procedimiento para la modelación con sedimentos y así observar el comportamiento hidráulico a la hora de ajustar el modelo.

Ahora bien, se muestra el error % teniendo en cuenta la modelación inicial con una rugosidad de 0.020.

**Tabla 32.**

*Alturas medidas en campo vs Altura modelada con N de 0.02*

Abscisas	Y medido	Y modelado (0.02)	Error %
<b>940</b>	0.811	0.75	8%
<b>920</b>	0.9324	0.77	21%
<b>870</b>	0.92	0.91	1%
<b>810</b>	0.82	0.86	5%
<b>610</b>	0.79	0.82	4%
<b>540</b>	0.67	0.86	22%

Luego, se ponen las rugosidades de manning resueltas en el ítem (8.3.2.1) y se analiza el error %.

**Tabla 33.**

*Alturas medidas en campo vs Altura modelada con N diferentes.*

Abscisas	Y medido	Y modelado	N Manning	Error %
<b>940</b>	0.811	1.19	0.05	32%
<b>920</b>	0.9324	1.22		24%
<b>870</b>	0.92	1.34	0.027	31%
<b>810</b>	0.82	1.28		36%
<b>610</b>	0.79	1.22	0.011	35%
<b>540</b>	0.67	1.26		47%

De la información anterior, se hace una gráfica comparativa para determinar qué tanto varía o qué porcentaje de error existe en el modelo con las diferentes alturas.

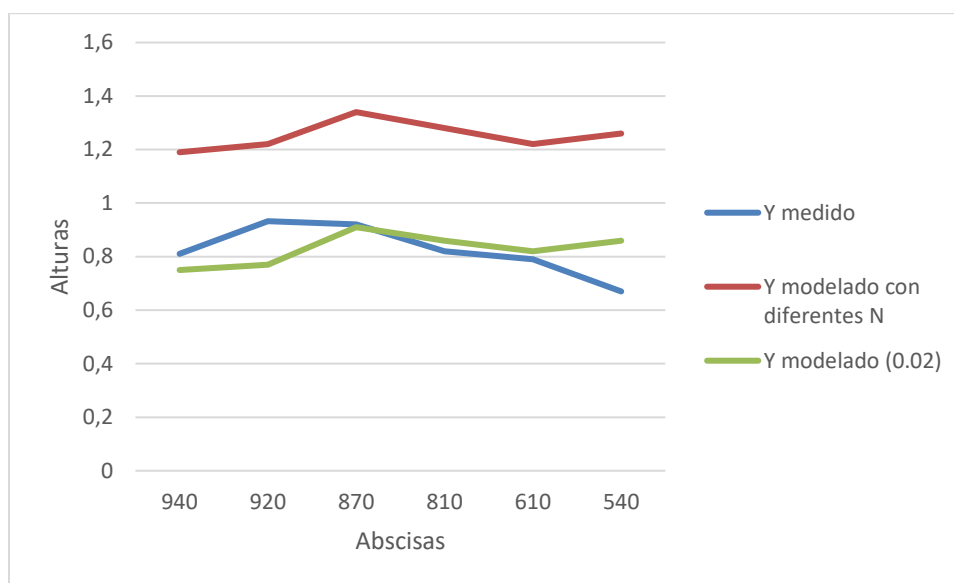


Figura 75. Comparación de Y medido vs Y modelado.

De la gráfica anterior se observa que las medidas modeladas arrojan un error porcentual alto, por lo tanto, hay que hacer una respectiva calibración para que los errores sean permisibles seleccionando valores de rugosidad que ayuden ajustar el modelo.

**Tabla 34.**

*Resultados obtenidos de calibración #1.*

Abscisas	Y modelado	Y medido	Error %	N (Manning)
<b>940</b>	0.83	0.811	2.29%	0.04
<b>920</b>	0.82	0.9324	13.71%	
<b>870</b>	0.91	0.92	1.10%	0.027
<b>810</b>	0.84	0.82	2.38%	
<b>610</b>	0.74	0.79	6.76%	0.01
<b>540</b>	0.79	0.67	15.19%	

Nota aclaratoria: Este procedimiento se realiza hasta que el error porcentual reduzca gradualmente a un valor permisible de manning.

**Tabla 35.***Resultados obtenidos de varias calibraciones.*

<b>N°#</b>	<b>CALIBRACION</b>				
	<b>Abscisas</b>	<b>Y modelado</b>	<b>Y medido</b>	<b>Error %</b>	<b>N (Manning)</b>
2	940	0.93	0.811	12.80%	0.06
	920	0.9	0.9324	3.60%	
	870	0.95	0.92	3.16%	0.027
	810	0.89	0.82	7.87%	
	610	0.83	0.79	4.82%	0.02
	540	0.87	0.67	22.99%	
3	<b>Abscisas</b>	<b>Y modelado</b>	<b>Y medido</b>	<b>Error %</b>	<b>N (Manning)</b>
	940	0.93	0.811	12.80%	0.06
	920	0.9	0.9324	3.60%	
	870	0.95	0.92	3.16%	0.027
	810	0.89	0.82	7.87%	
	610	0.83	0.79	4.82%	0.02
	540	0.87	0.67	22.99%	
4	<b>Abscisas</b>	<b>Y modelado</b>	<b>Y medido</b>	<b>Error %</b>	<b>N (Manning)</b>
	940	0.92	0.811	11.85%	0.055
	920	0.9	0.9324	3.60%	
	870	0.97	0.92	5.15%	0.027
	810	0.91	0.82	9.89%	
	610	0.85	0.79	7.06%	0.022
	540	0.9	0.67	25.56%	
5	<b>Abscisas</b>	<b>Y modelado</b>	<b>Y medido</b>	<b>Error %</b>	<b>N (Manning)</b>
	940	0.9	0.811	9.89%	0.052
	920	0.87	0.9324	7.17%	
	870	0.95	0.92	3.16%	0.027
	810	0.89	0.82	7.87%	
	610	0.81	0.79	2.47%	0.019
	540	0.86	0.67	22.09%	

**Tabla 36.***Resultados obtenidos de varias calibraciones.*

<b>N°#</b>	<b>CALIBRACION</b>				
	<b>Abscisas</b>	<b>Y modelado</b>	<b>Y medido</b>	<b>Error %</b>	<b>N (Manning)</b>
6	940	0.87	0.811	6.78%	0.047
	920	0.86	0.9324	8.42%	
	870	0.94	0.92	2.13%	0.027
	810	0.87	0.82	5.75%	
	610	0.79	0.79	0.00%	0.017
	540	0.84	0.67	20.24%	
7	<b>Abscisas</b>	<b>Y modelado</b>	<b>Y medido</b>	<b>Error %</b>	<b>N (Manning)</b>
	940	0.91	0.811	10.88%	0.045
	920	0.91	0.9324	2.46%	
	870	1.01	0.92	8.91%	0.027
	810	0.95	0.82	13.68%	
	610	0.77	0.79	2.60%	0.015
	540	0.82	0.67	18.29%	
8	<b>Abscisas</b>	<b>Y modelado</b>	<b>Y medido</b>	<b>Error %</b>	<b>N (Manning)</b>
	940	0.9	0.811	9.89%	0.043
	920	0.9	0.9324	3.60%	
	870	1	0.92	8.00%	0.027
	810	0.94	0.82	12.77%	
	610	0.75	0.79	5.33%	0.013
	540	0.8	0.67	16.25%	
9	<b>Abscisas</b>	<b>Y modelado</b>	<b>Y medido</b>	<b>Error %</b>	<b>N (Manning)</b>
	940	0.88	0.811	7.84%	0.04
	920	0.89	0.9324	4.76%	
	870	0.99	0.92	7.07%	0.027
	810	0.94	0.82	12.77%	
	610	0.74	0.79	6.76%	0.009
	540	0.79	0.67	15.19%	

**Tabla 37.***Resultados obtenidos de varias calibraciones.*

N°#	CALIBRACION				
	Abscisas	Y modelado	Y medido	Error %	N (Manning)
10	940	1.22	0.811	33.52%	0.0395
	920	1.25	0.9324	25.41%	
	870	1.37	0.92	32.85%	0.027
	810	1.31	0.82	37.40%	
	610	1.25	0.79	36.80%	0.007
	540	1.29	0.67	48.06%	
11	Abscisas	Y modelado	Y medido	Error %	N (Manning)
	940	0.88	0.811	7.84%	0.039
	920	0.88	0.9324	5.95%	
	870	0.99	0.92	7.07%	0.027
	810	0.93	0.82	11.83%	
	610	0.73	0.79	8.22%	0.007
	540	0.79	0.67	15.19%	
12	Abscisas	Y modelado	Y medido	Error %	N (Manning)
	940	0.81	0.811	0.12%	0.039
	920	0.8	0.9324	16.55%	
	870	0.89	0.92	3.37%	0.025
	810	0.82	0.82	0.00%	
	610	0.73	0.79	8.22%	0.005
	540	0.79	0.67	15.19%	
13	Abscisas	Y modelado	Y medido	Error %	N (Manning)
	940	0.88	0.811	7.84%	0.04
	920	0.89	0.9324	4.76%	
	870	0.99	0.92	7.07%	0.027
	810	0.94	0.82	12.77%	
	610	0.74	0.79	6.76%	0.009
	540	0.79	0.67	15.19%	

Aquí se observan las variaciones de errores porcentuales que se muestran en las tablas anteriores. Para disminuir el porcentaje de error gradualmente, se recomienda una limpieza del canal u otras alternativas de solución a largo plazo y resultaría una nueva sección óptima.

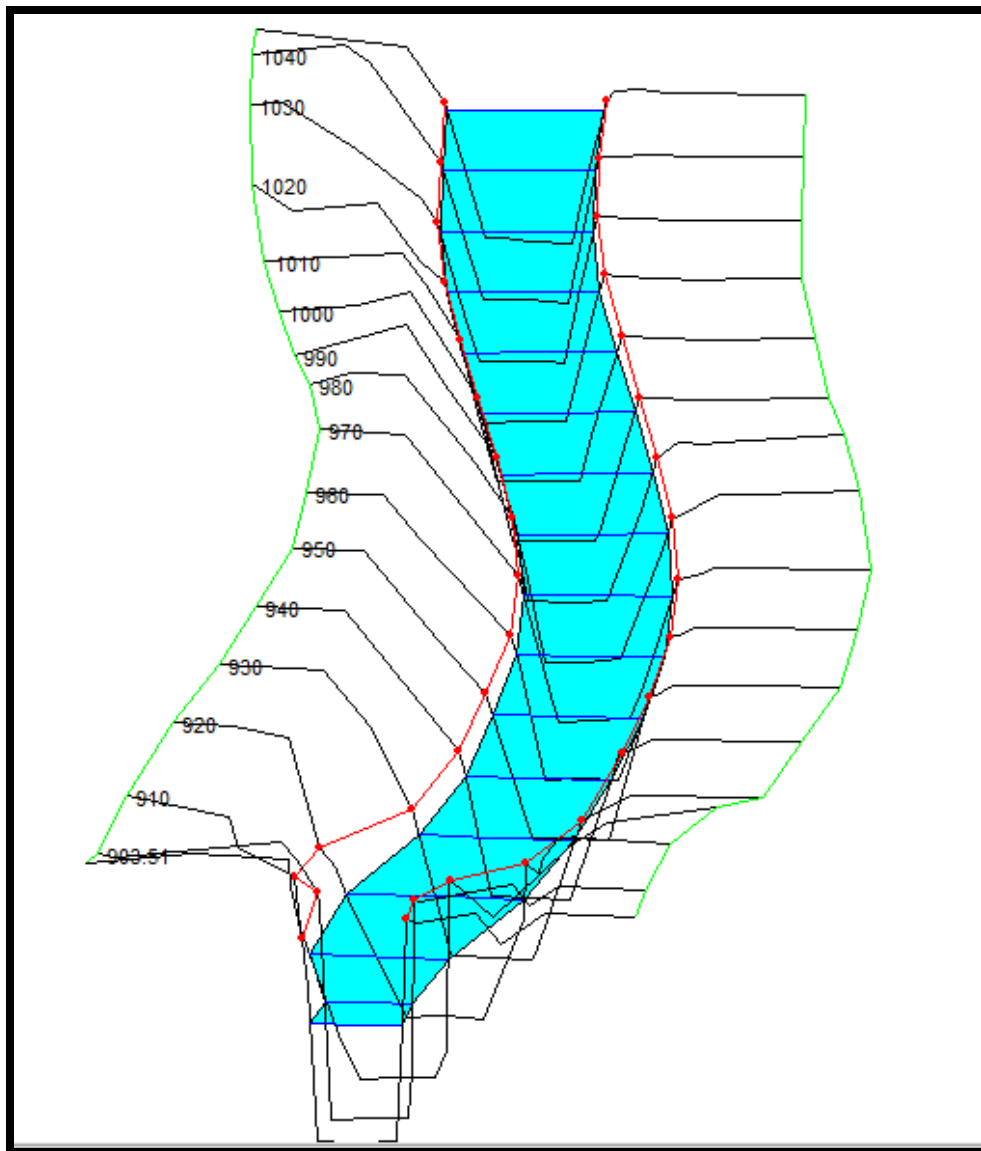


***13.5.1 Abscisa 1050 a 900. Inicio de la modelación (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo). Calibrado.***

**Tabla 38.**

*Abscisa 1050 a 700. inicio de la modelación (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo).*

Tramo	Desbordamientos	Puntos críticos
<b>1050 A 900</b>	No se presentan.	No existen. Ver F. 77 y 78.



*Figura 76.* Resultado de calibración con el Q. funcionamiento + Q. Hidrología, abscisas 1050 a 900.

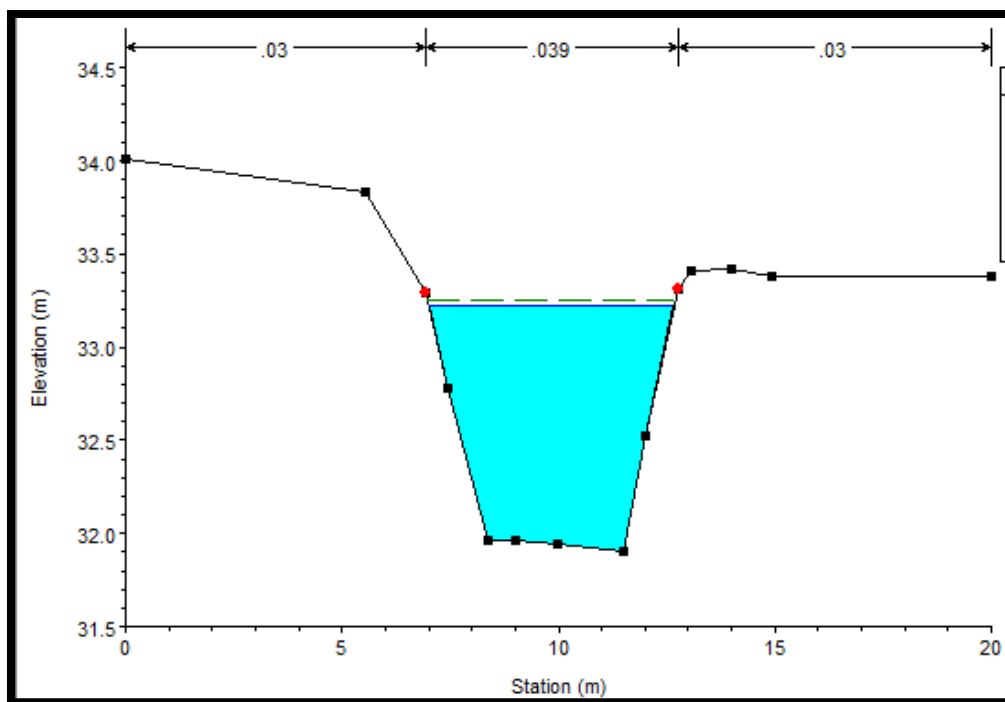


Figura 77. Sección transversal 1050 calibrado.

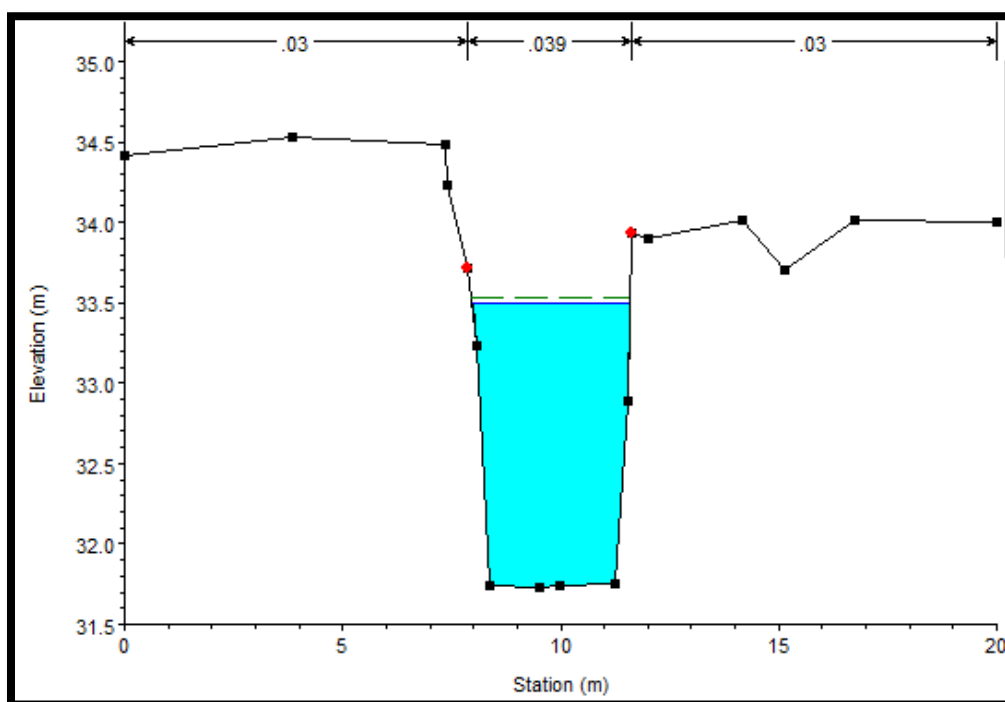


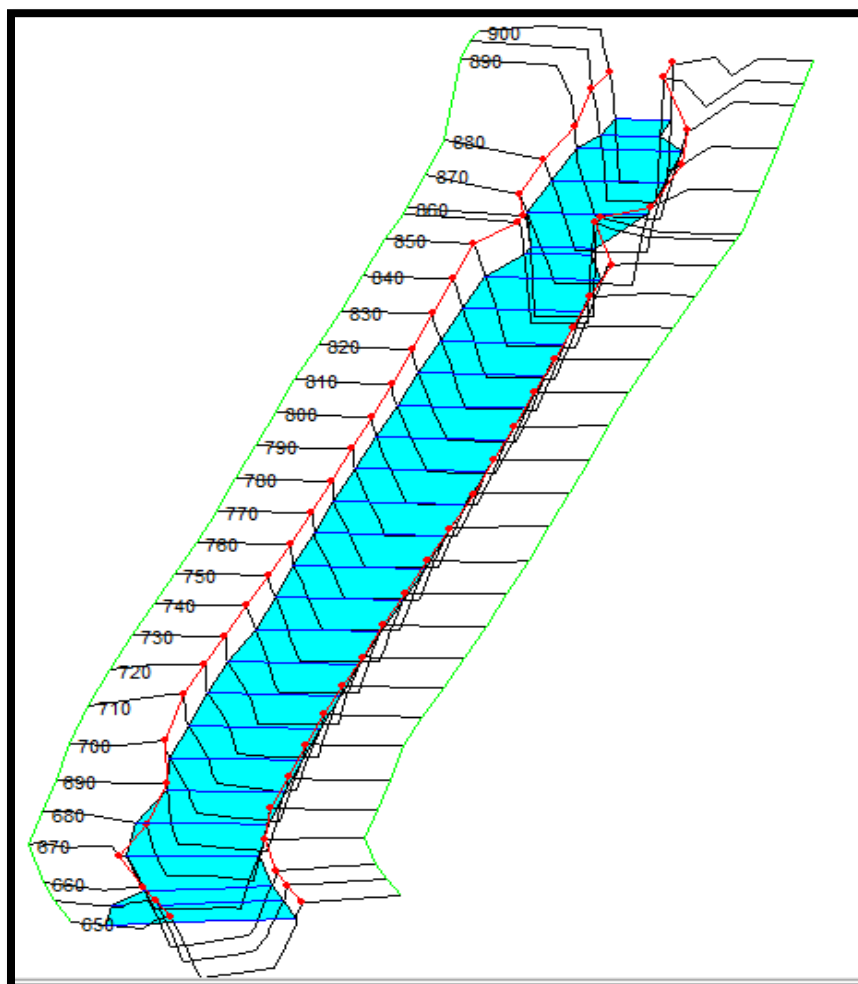
Figura 78. Sección transversal 900 calibrado.

**13.5.2 Abscisa 900 a 650. (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo). Calibrado.**

**Tabla 39.**

*Abscisa 900 a 650. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo).*

Tramo	Desbordamientos	Puntos críticos
<b>900 A 650</b>	No se presentan.	No existen. ver F.79 y 81.



*Figura 79. Resultado de calibración con el Q. funcionamiento + Q. Hidrología, abscisas 900 a 650.*

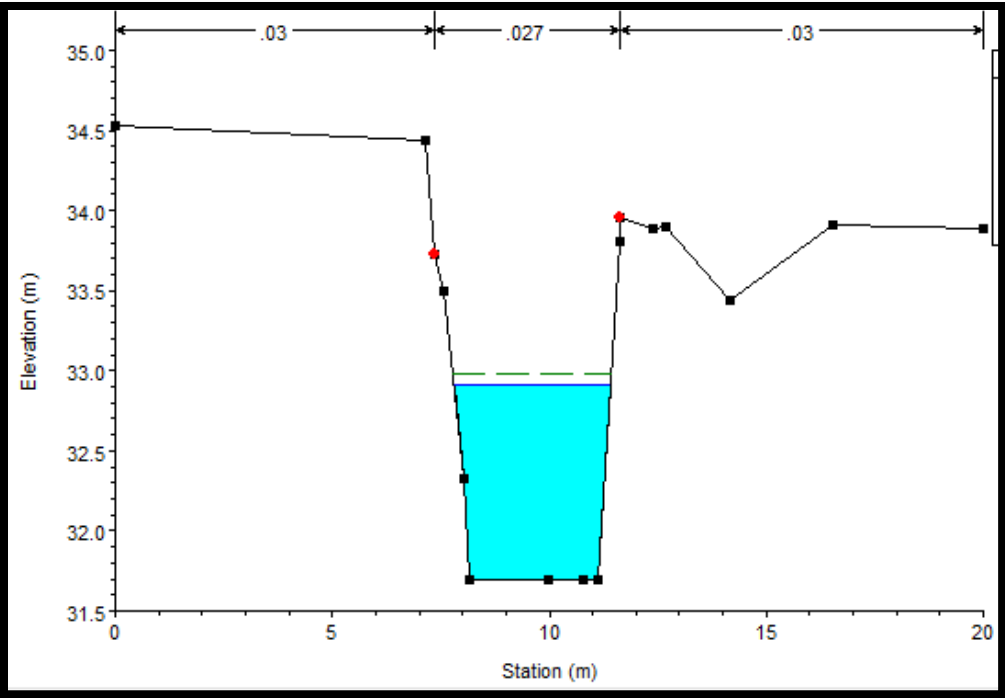


Figura 80. Sección transversal 894.84 calibrado.

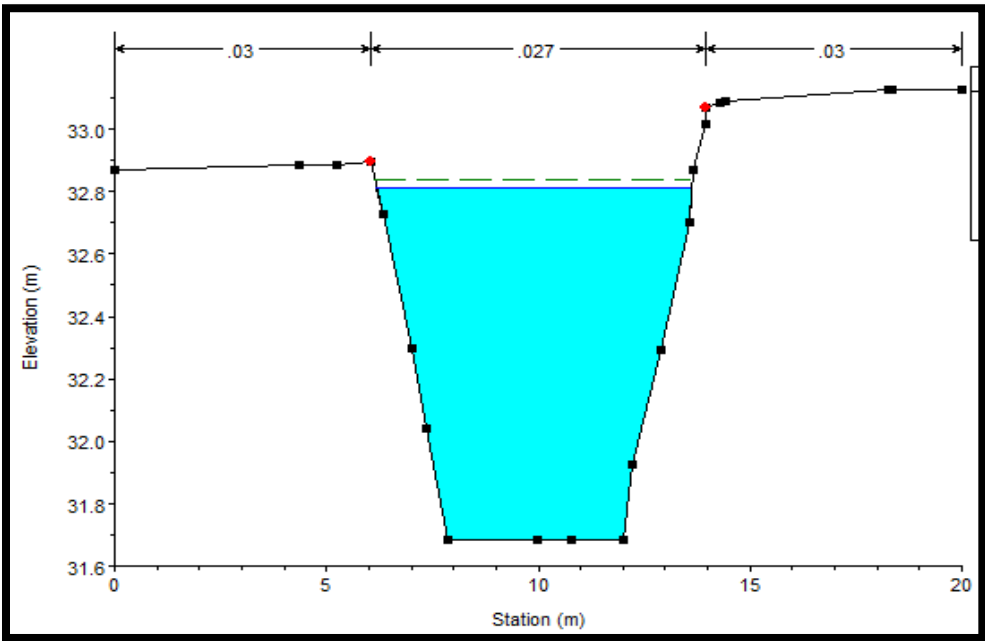


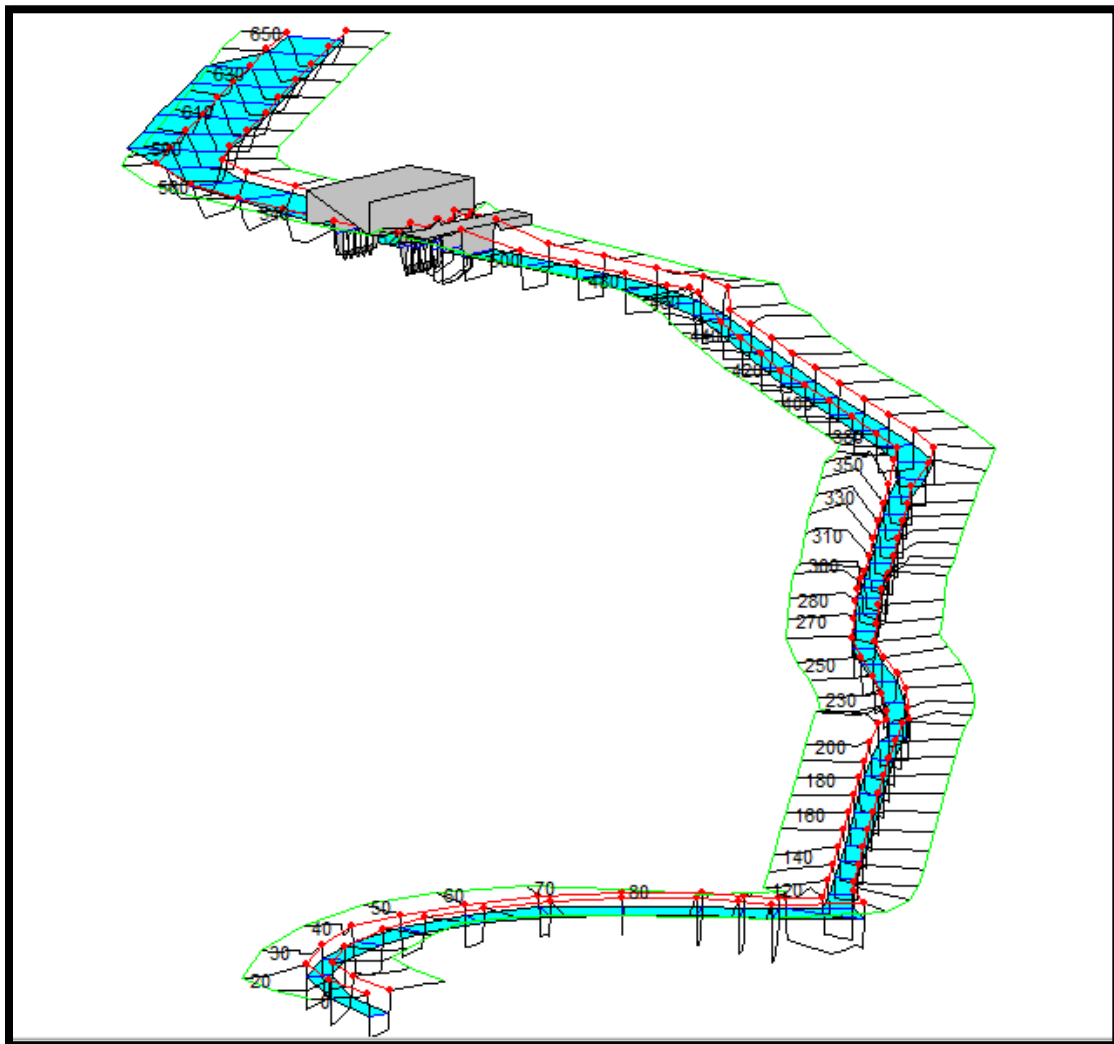
Figura 81. Sección transversal 650 calibrado.

**13.5.3 Abscisa 650 a 0. (Punto final de modelación). (Sentido de aguas arriba hacia aguas abajo). Calibrado.**

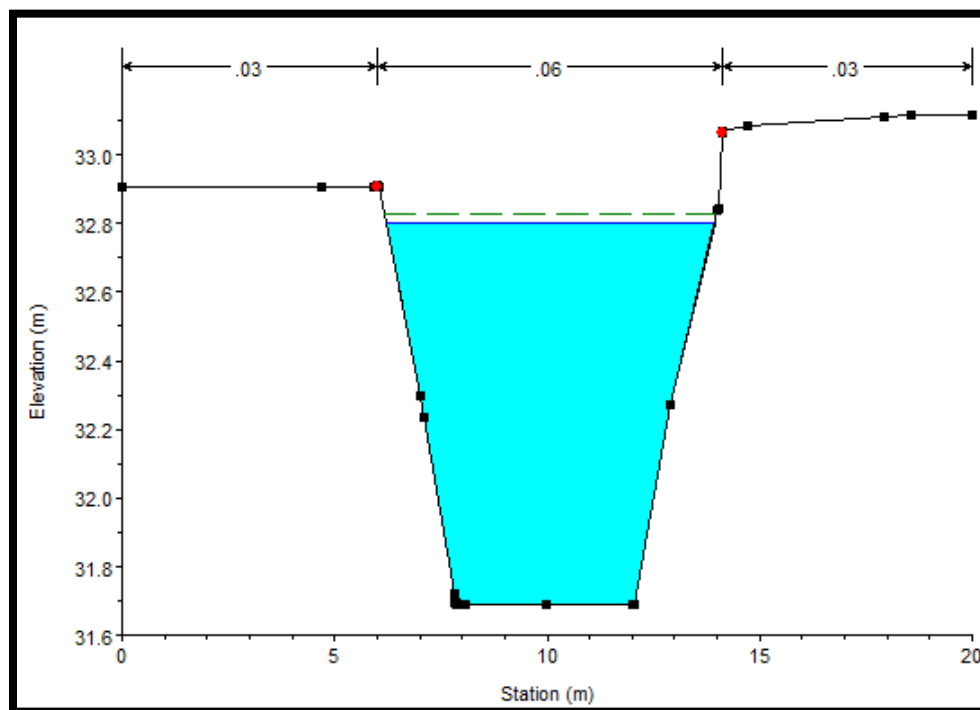
**Tabla 40.**

*Abscisa 650 a 0. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo).*

Tramo	Desbordamientos	Puntos críticos
<b>650 A 0</b>	No se presentan.	No existen. Ver F.83
<b>630 A 580</b>	Se presentan	Lado Derecho. Ver F. 84 y 85
<b>580 A 0</b>	No se presentan	No existen. Ver. F. 86.



*Figura 82.* Resultado de calibración con el Q. funcionamiento + Q. Hidrología, abscisas 900 a 650.



*Figura 83.* Sección transversal 640 calibrado.

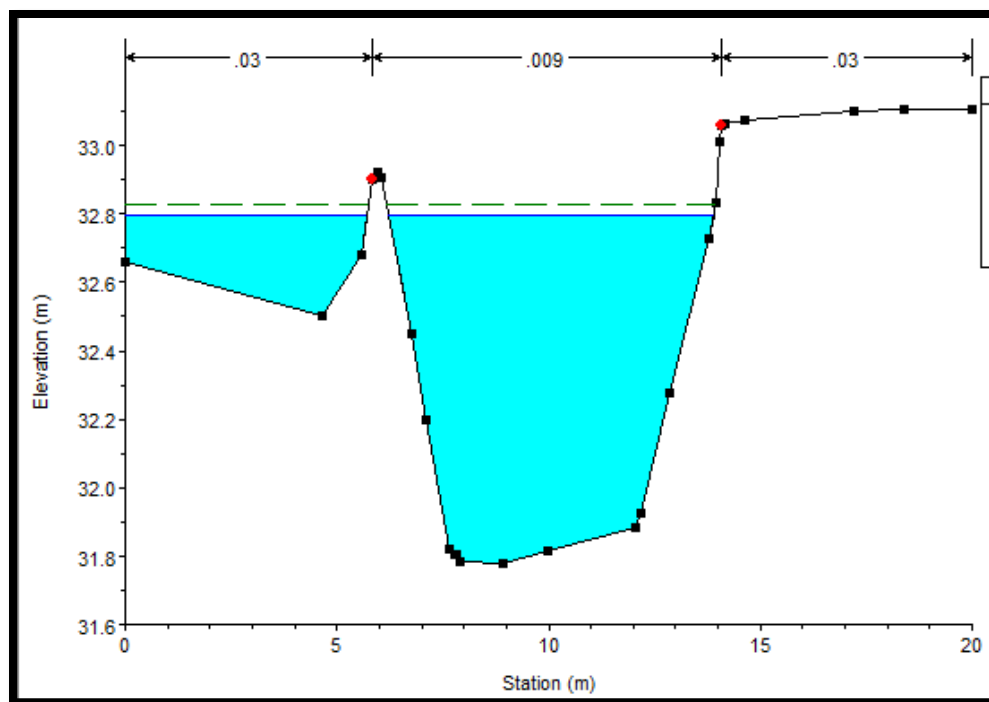


Figura 84. Sección transversal 630 calibrado.

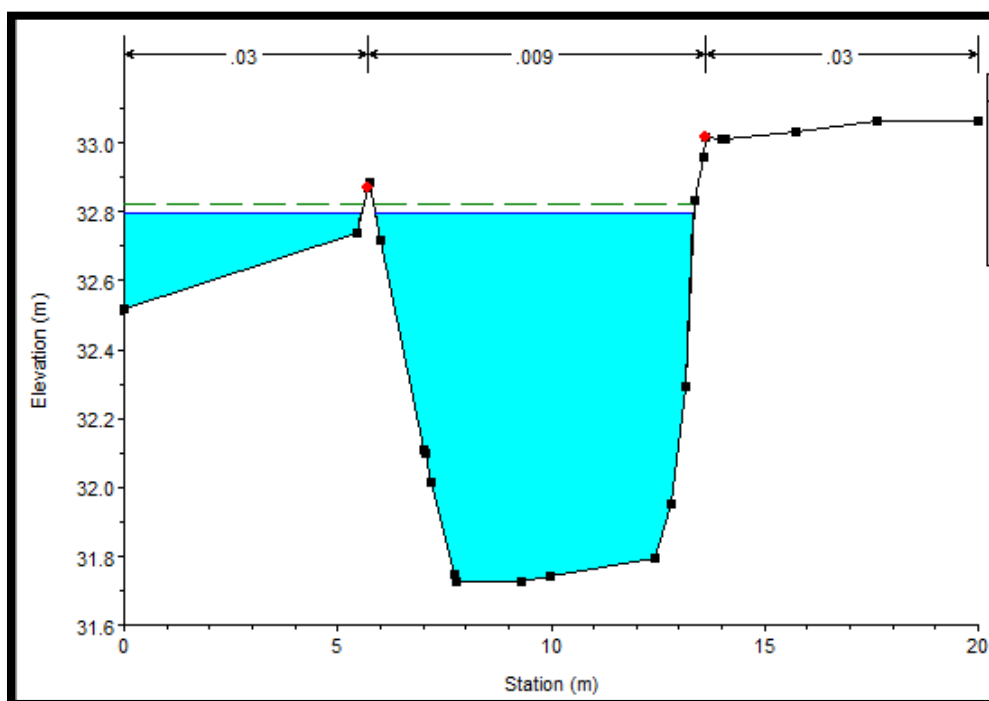


Figura 85. Sección transversal 580 calibrado.



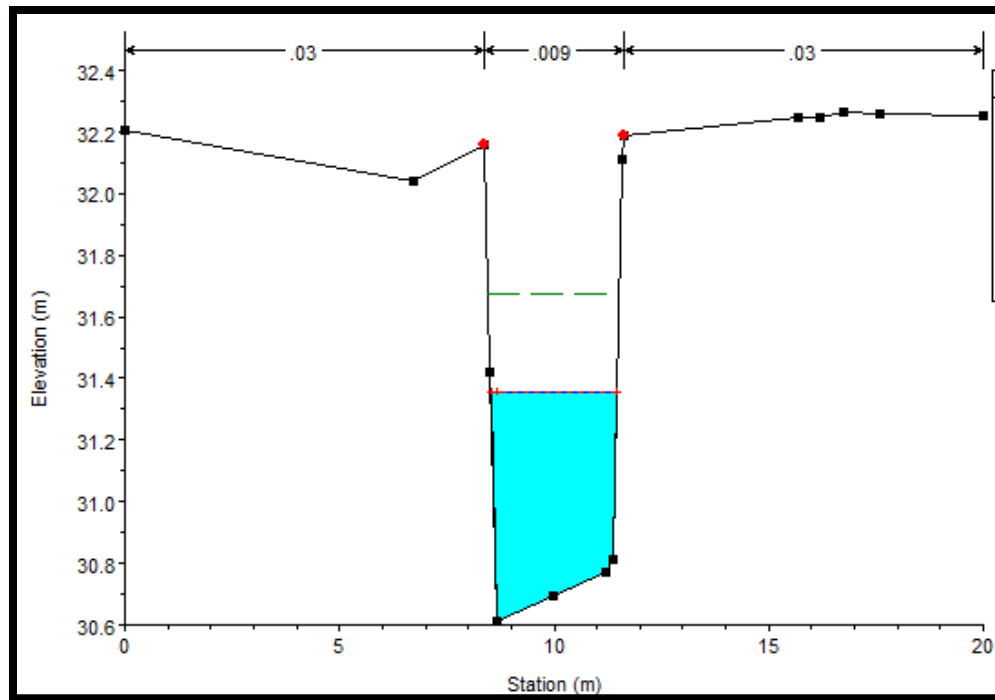


Figura 86. Sección transversal 0 calibrado.

### 13.6 Escenario 5 (sección trapezoidal) alternativa de solución 1.

- Talud 2:1
  - Aprovechamiento del fondo del canal existente.
- Base 3.03 m
  - Aprovechamiento del fondo del canal.
- Material del canal: 0.03 a los lados (lados de piedra cementada) y 0.013 (concreto).

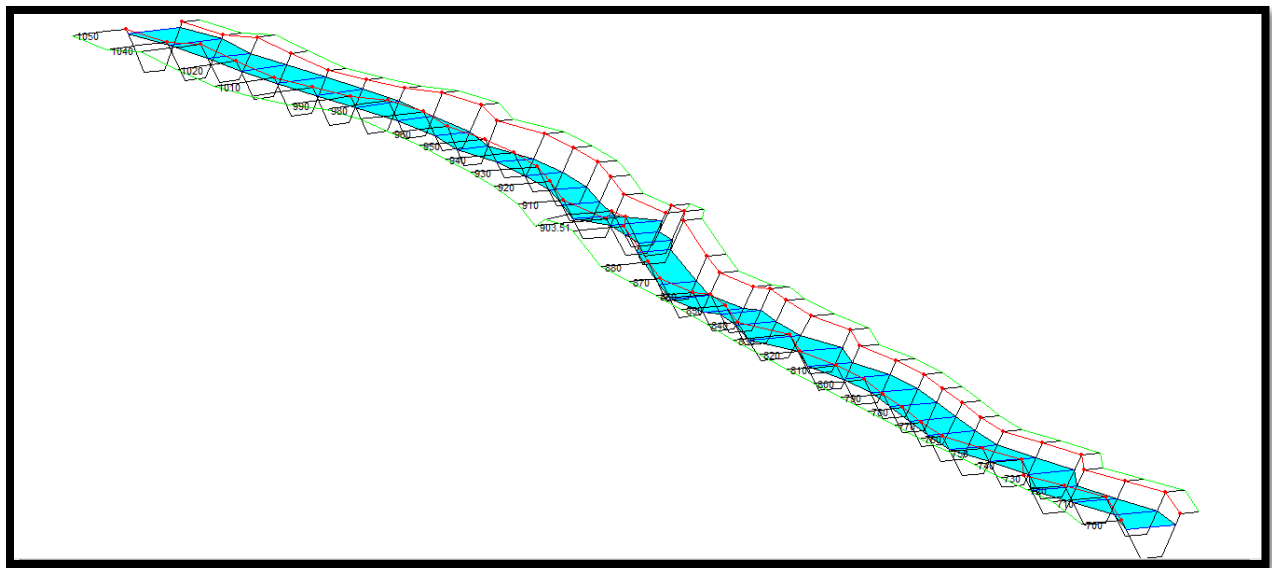


**13.6.1 Abscisas 1050 a 700. Inicio de la modelación (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo).**

**Tabla 41.**

*Abscisa 1050 a 0. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo).*

Tramo	Desbordamientos	Puntos críticos
<b>1050 a 700</b>	No se presentan.	No existen. Ver F.88 y 89



*Figura 87. Abscisa 1050 a 700. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo).*

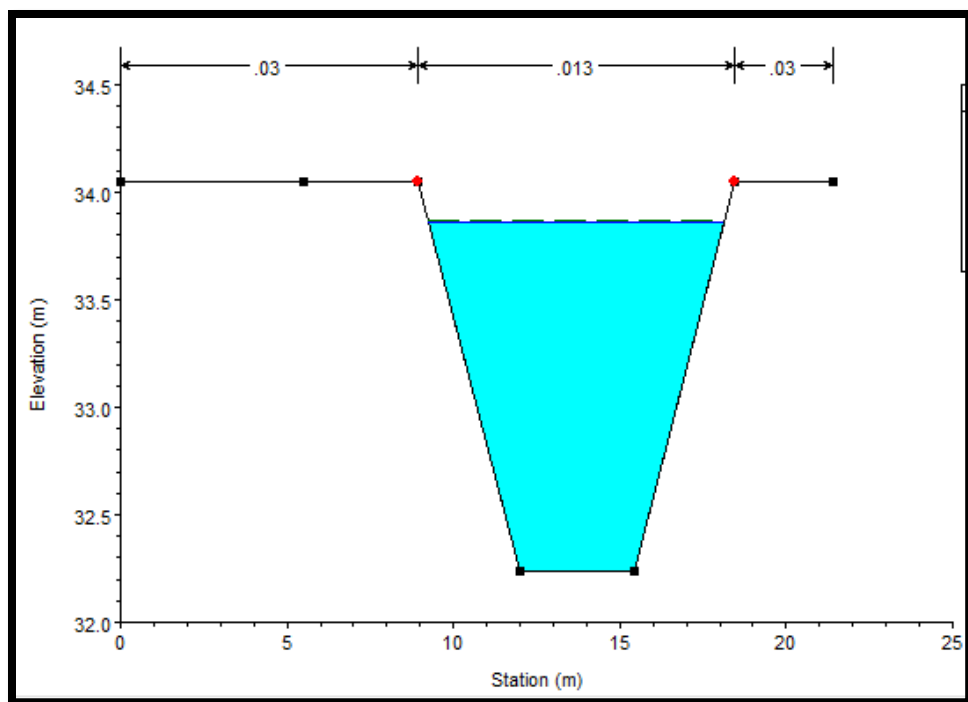


Figura 88. Sección transversal sección abscisa 1050.

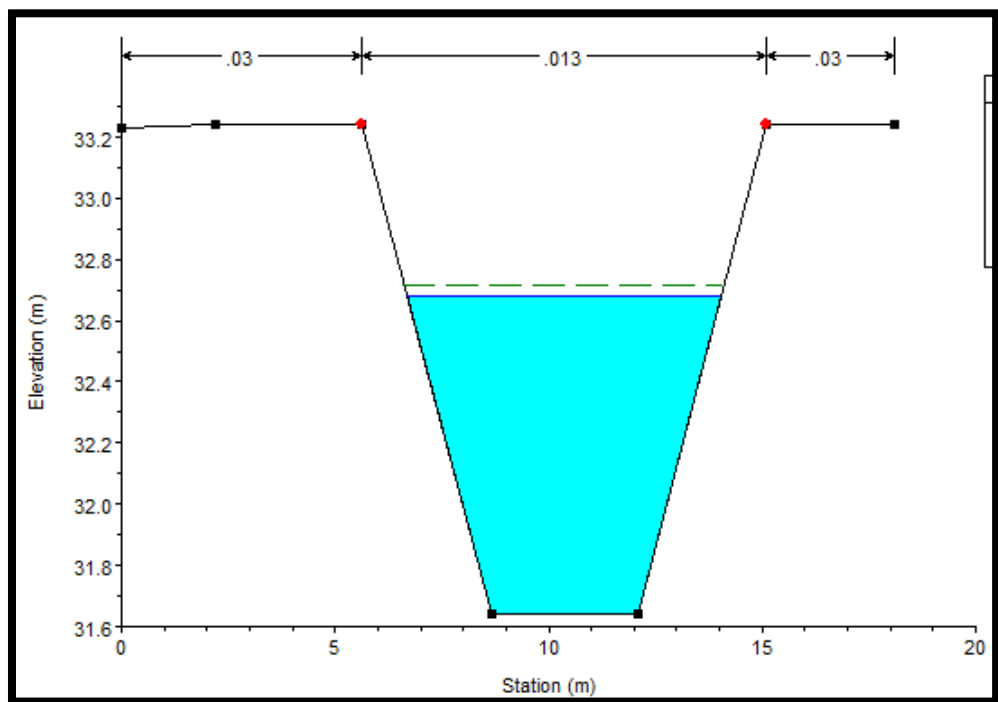


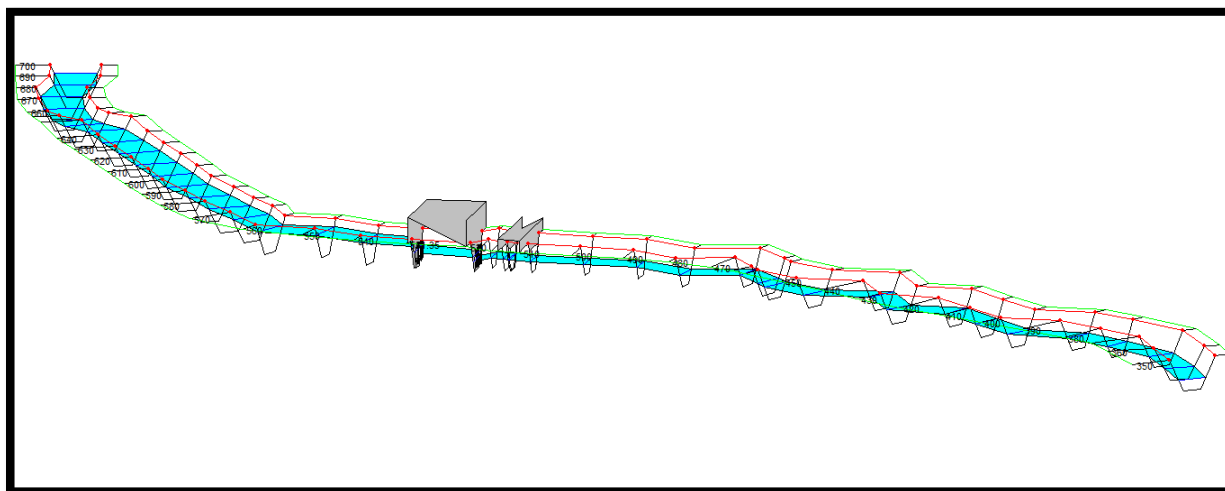
Figura 89. Sección transversal sección abscisa 700.

### 13.6.2 Abscisas 700 a 350. (Sentido de aguas arriba hacia aguas abajo).

**Tabla 42.**

*Abscisa 700 a 350. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo).*

Tramo	Desbordamientos	Puntos críticos
<b>700 a 350</b>	No se presentan.	No existen. Ver f.91, 93 y 94.



*Figura 90. Abscisa 700 a 350. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo).*

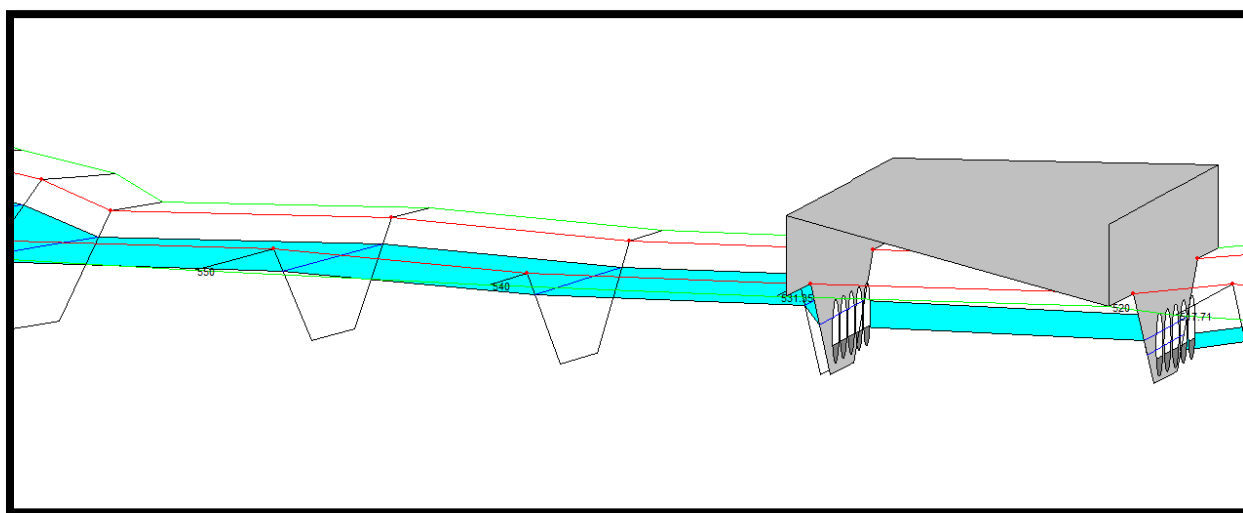


Figura 91. Comportamiento del canal con la nueva sección en puente canal abscisa 531.

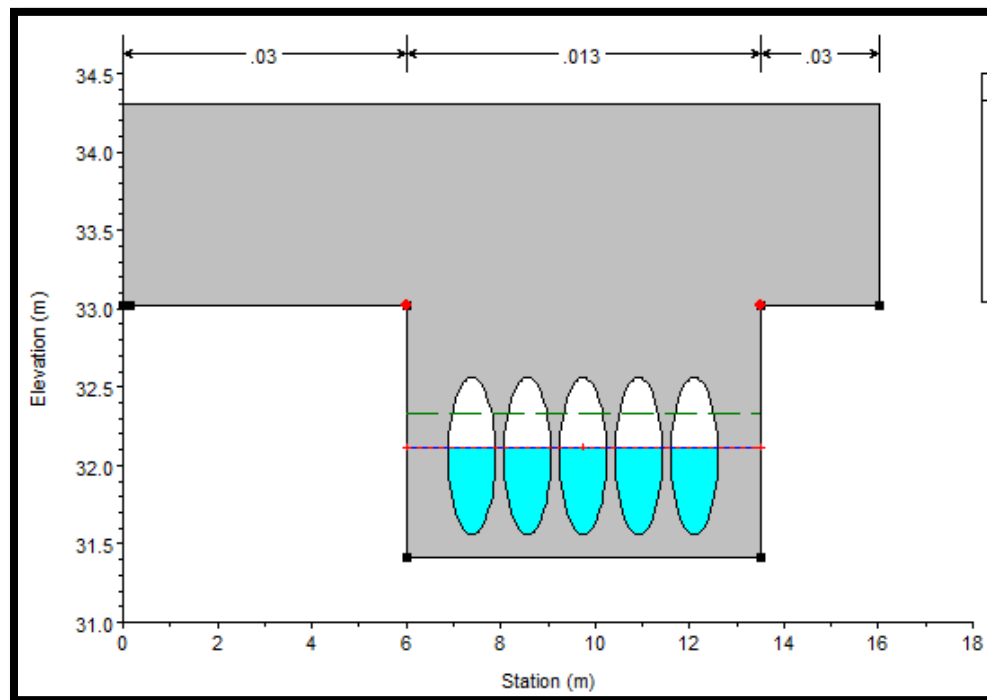


Figura 92. Sección transversal puente canal.

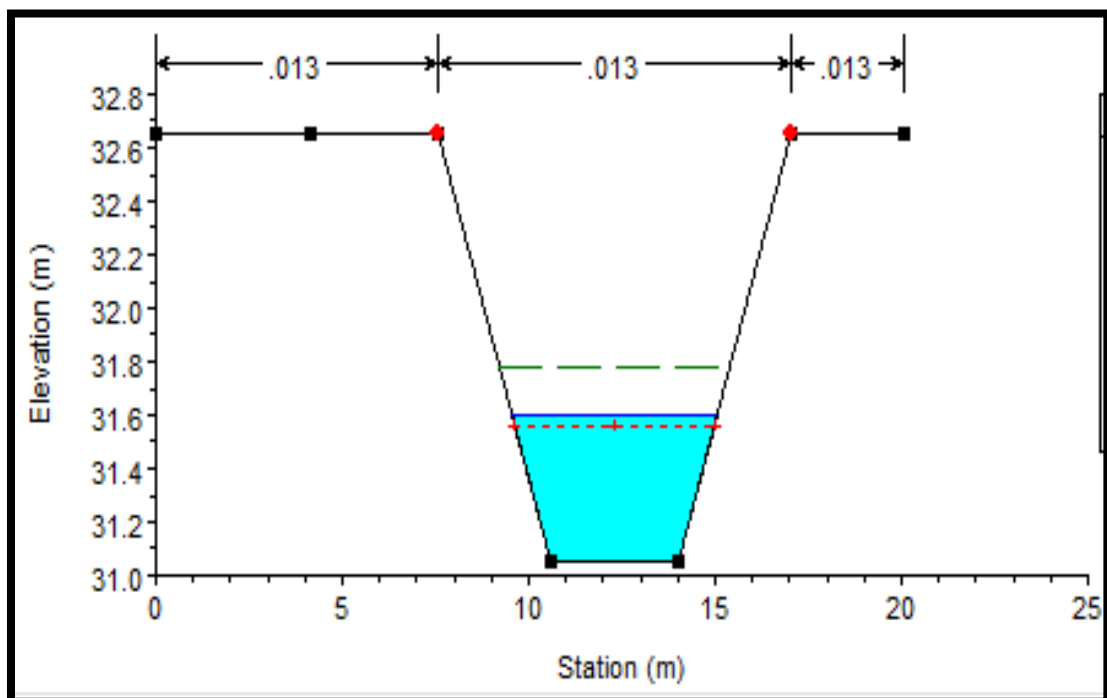


Figura 93. Sección transversal abscisa 350.

13.6.3 Abscisas 350 a 0. (Punto final de modelación). (Sentido de aguas arriba hacia aguas abajo).

Tabla 43.

Abscisa 350 a 0. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo).

TRAMO	DESBORDAMIENTOS	PUNTOS CRITICOS
350 a 0	No se presentan.	No existen. Ver f.95 y 96.

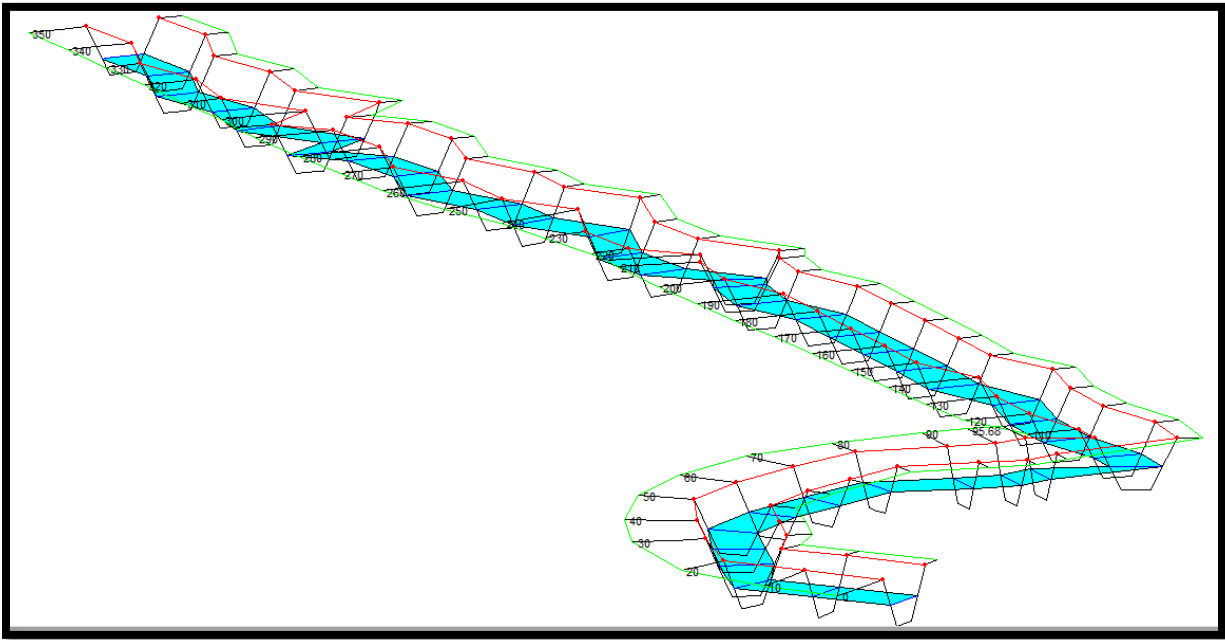


Figura 94. Tramo del canal apartir de la abscisas 350 a 0.

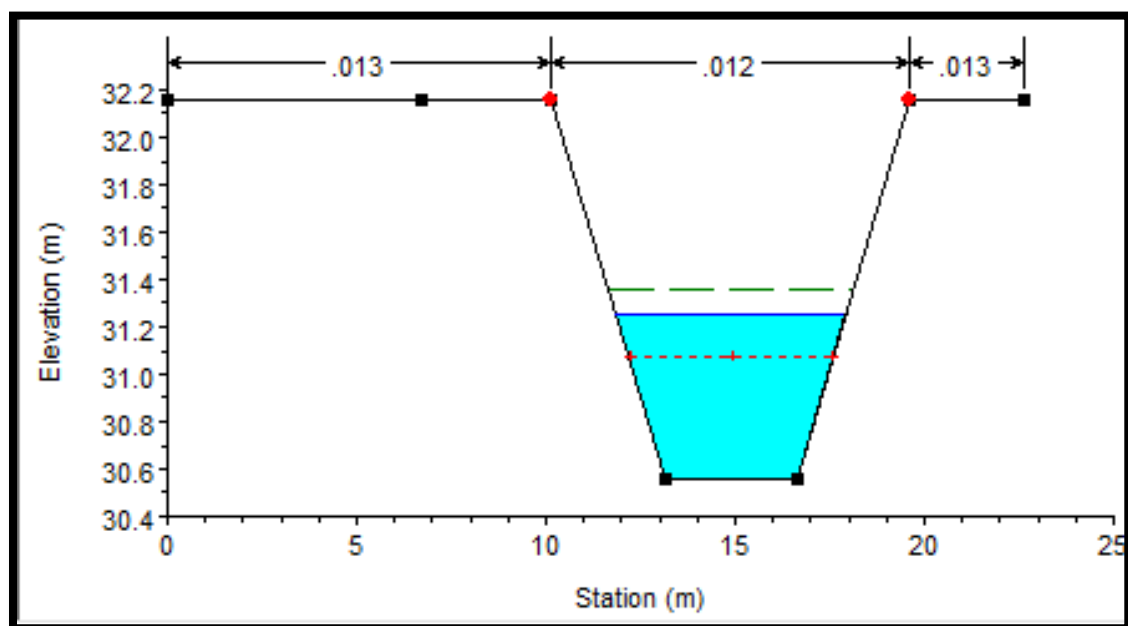




Figura 96. Sección transversal abscisa 0.

### **13.7 Escenario 6. (Sección rectangular) alternativa de solución 2**

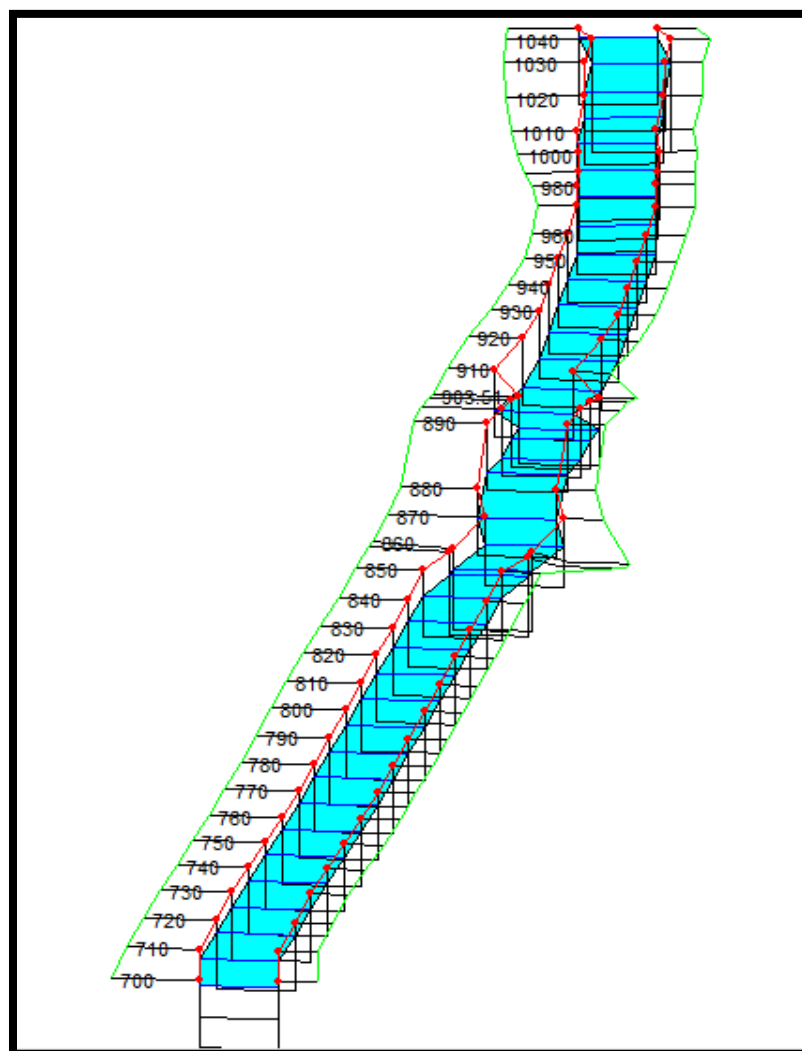
- Altura 1.5 m
  - Aprovechamiento del fondo del canal existente.
  
- Base 6.12 m
  - aprovechamiento del fondo del canal.
  
- Material del canal: 0.03 a los lados (lados de piedra cementada) y 0.013 (concreto).

**13.7.1 Abscisas 1050 a 700. Inicio de la modelación (sentido de aguas arriba hacia aguas abajo).**

**Tabla 44.**

*Abscisa 1050 a 700. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo).*

TRAMO	DESBORDAMIENTOS	PUNTOS CRÍTICOS
<b>1050 a 700</b>	No se presentan.	No existen. Ver f.98 y f.99



*Figura 97. Tramo del canal apartir de la abscisas 1050 a 700.*

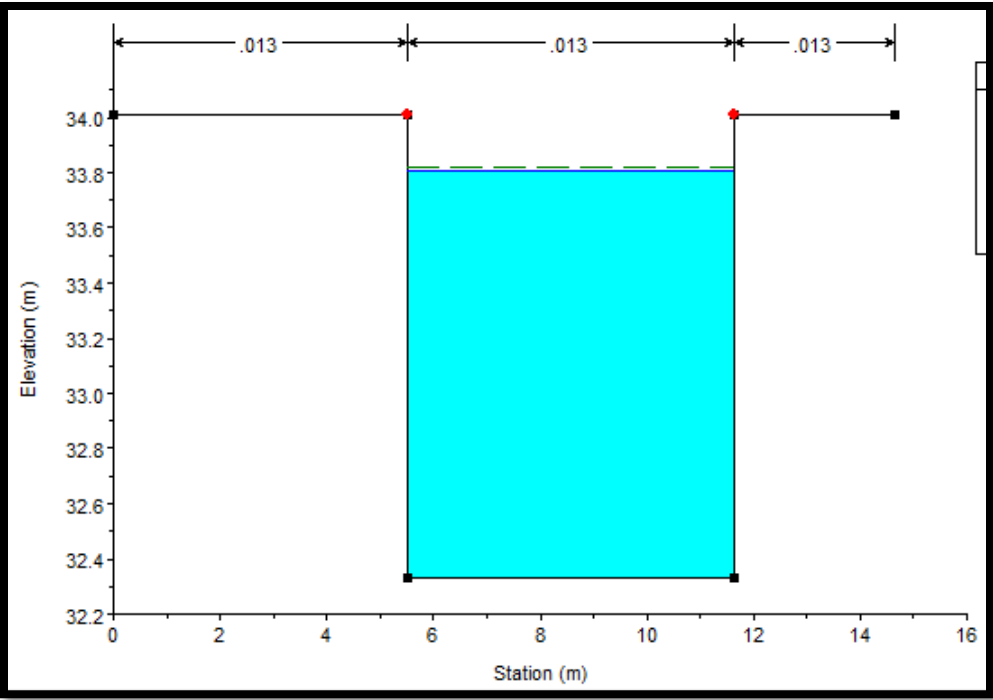


Figura 98. Sección transversal abscisa 1050.

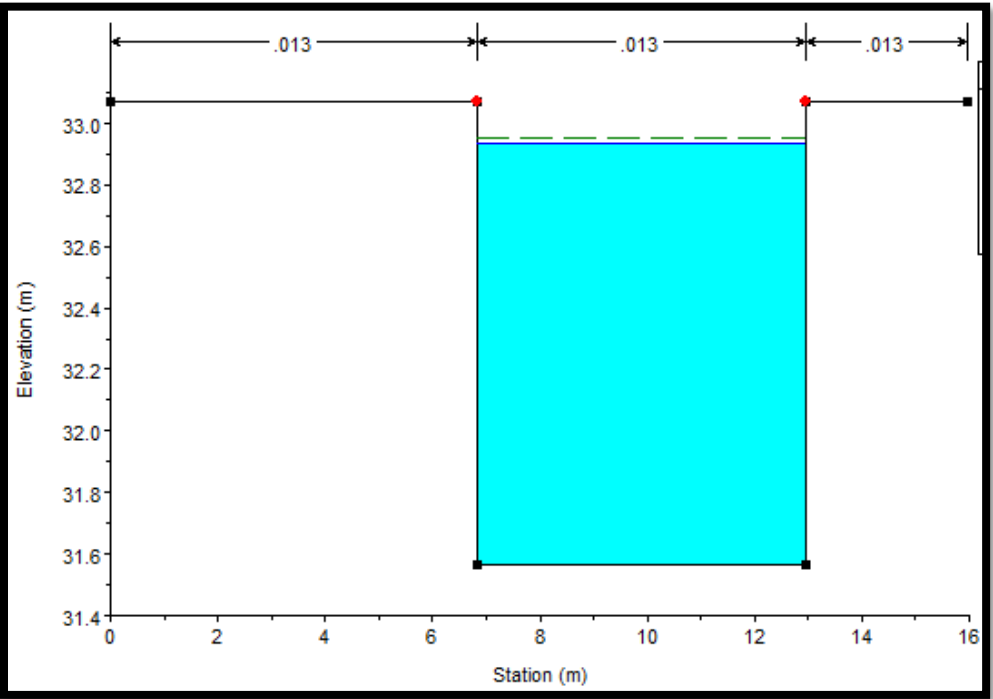


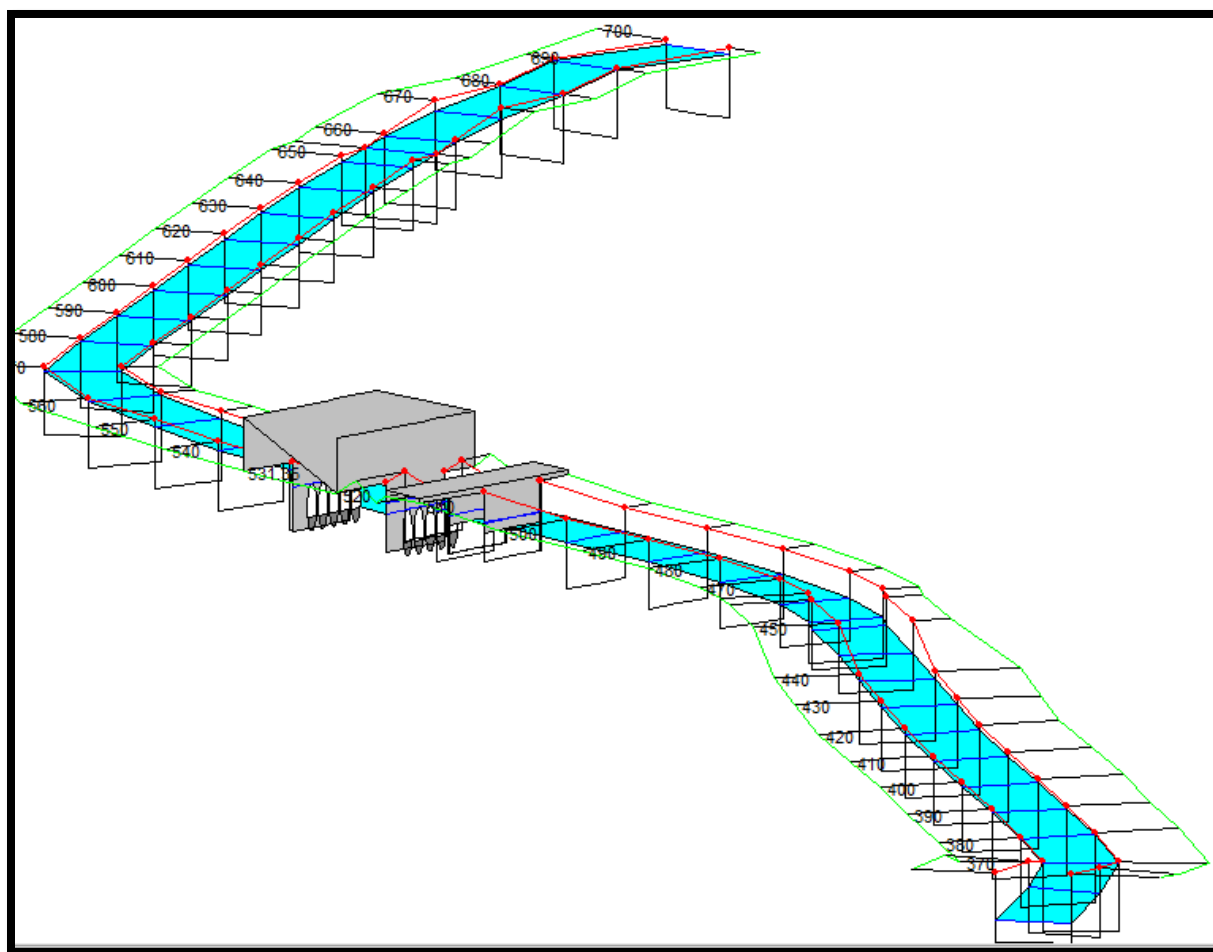
Figura 99. Sección transversal abscisa 700.

### 13.7.2 Abscisas 700 a 350. (Sentido de aguas arriba hacia aguas abajo).

**Tabla 45.**

*Abscisa 700 a 350. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo).*

TRAMO	DESBORDAMIENTOS	PUNTOS CRITICOS
<b>700 a 350</b>	No se presentan.	No existen. Ver f.101,102 y 103.



*Figura 100.* Tramo del canal apartir de la abscisas 700 a 350.

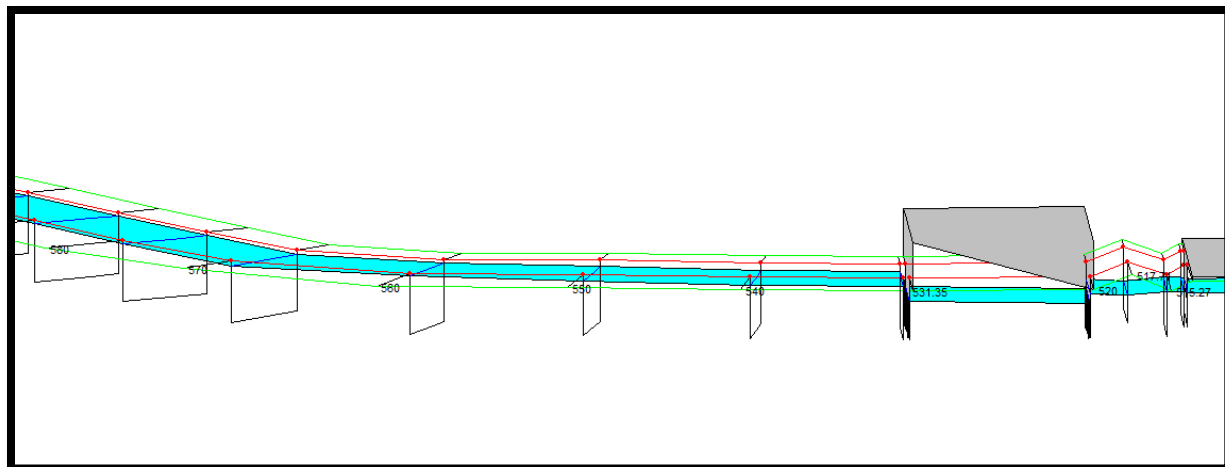


Figura 101. Comportamiento del canal con la nueva sección en puente canal abscisa 531.

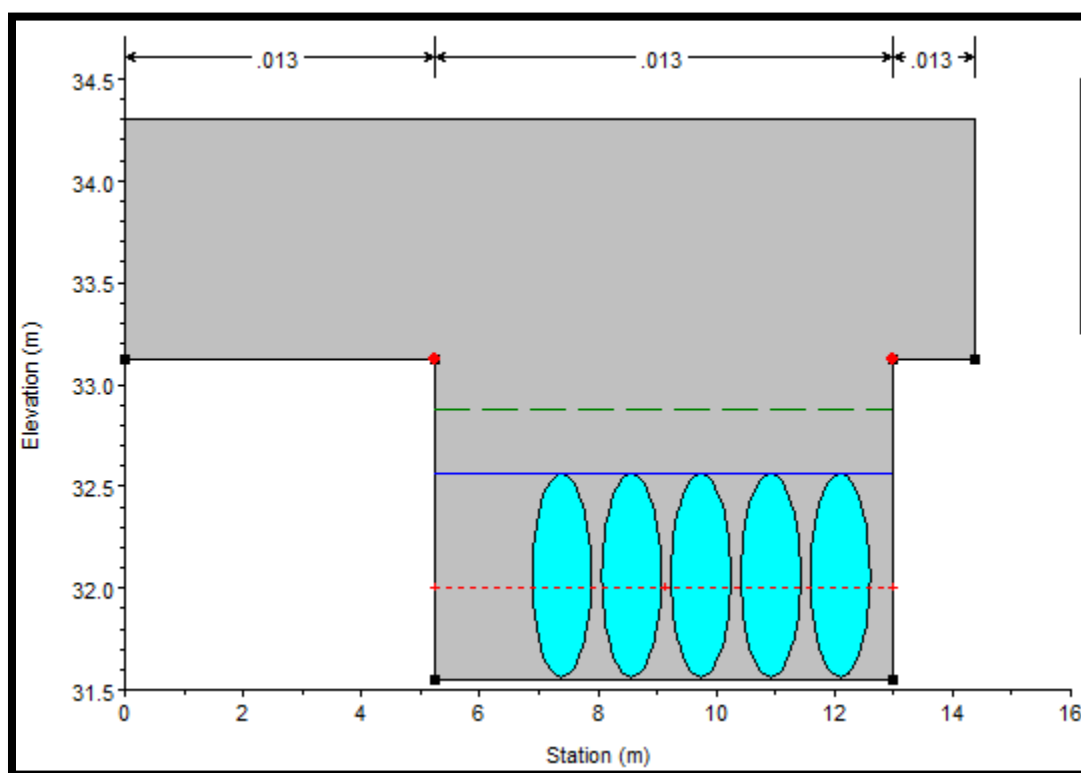


Figura 102. Comportamiento del canal con la nueva sección en puente canal abscisa 531.

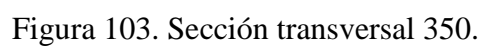


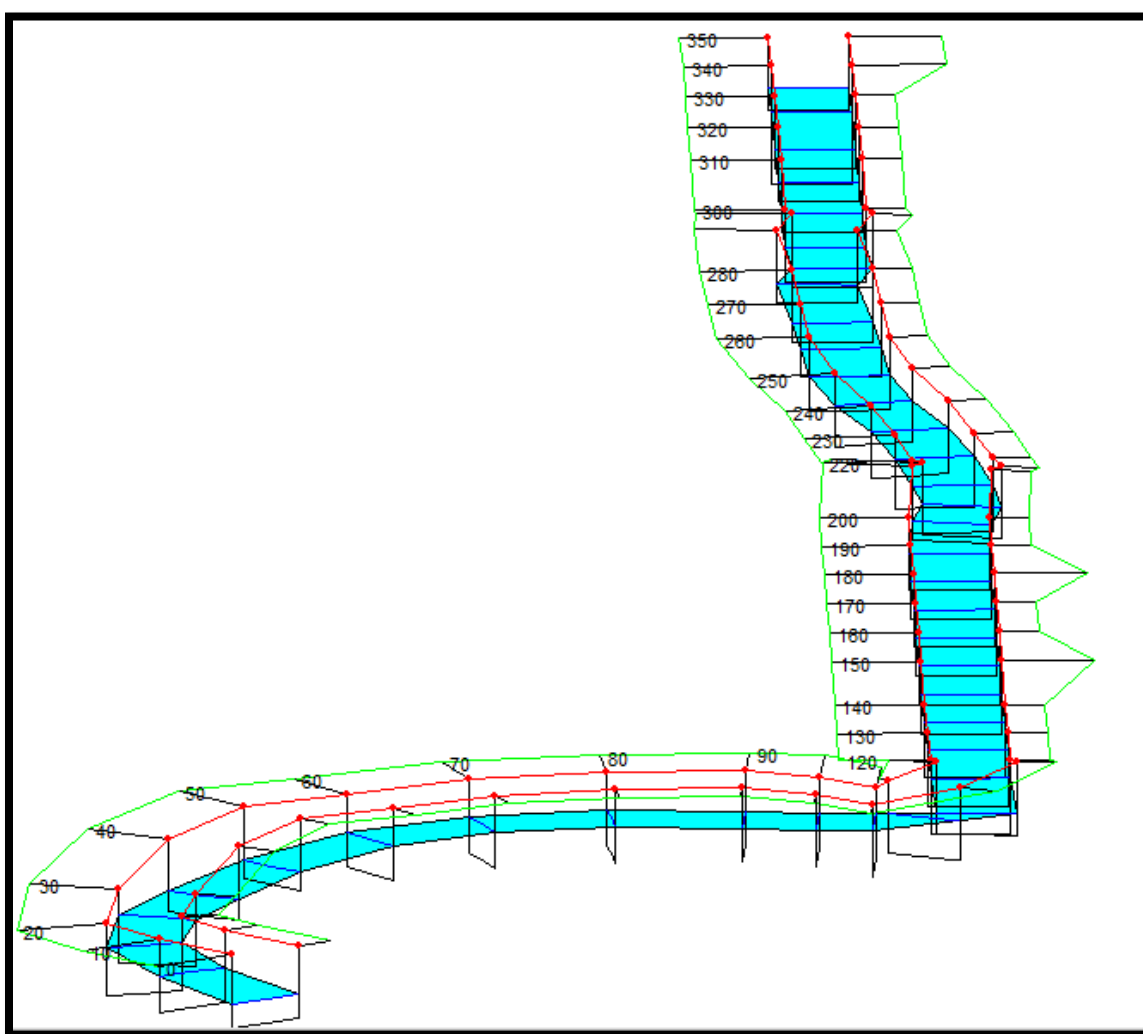
Figura 103. Sección transversal 350.

**13.7.3 Abscisas 350 a 0. (Punto final de modelación). (Sentido de aguas arriba hacia aguas abajo).**

**Tabla 46.**

*Abscisa 350 a 0. (Sentido de Aguas arriba hacia Aguas abajo).*

TRAMO	DESBORDAMIENTOS	PUNTOS CRÍTICOS
<b>700 a 350</b>	No se presentan.	No existen. Ver f.105 y 106.



*Figura 104.* Tramo del canal apartir de la abscisas 700 a 350.

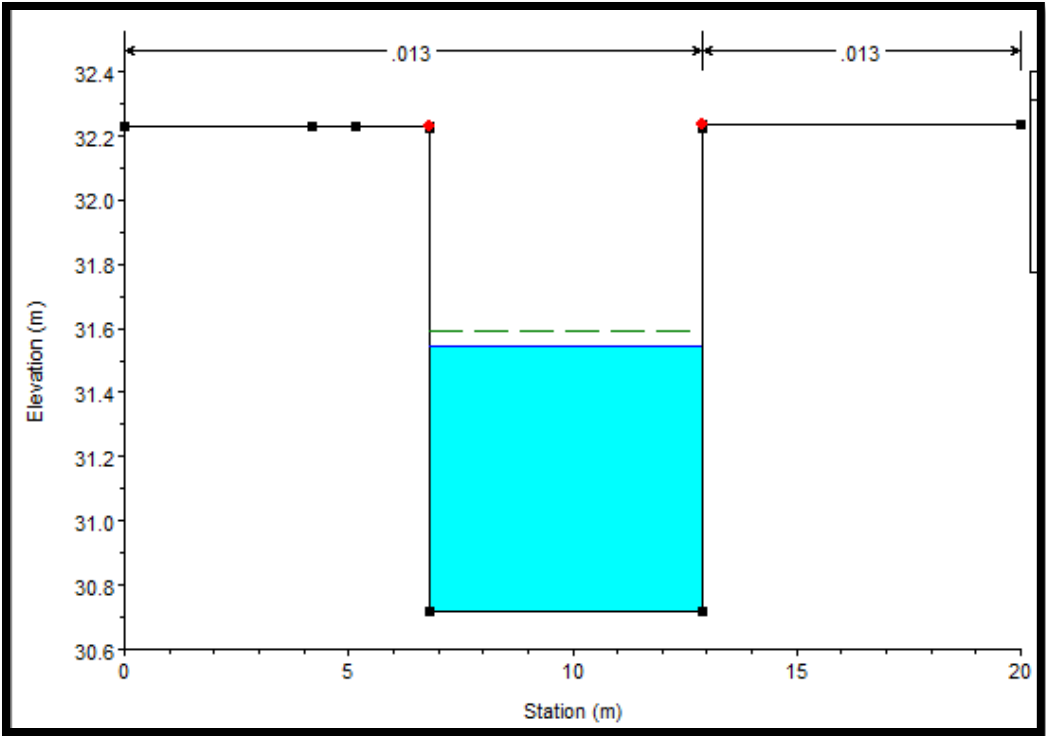


Figura 105. Sección transversal abscisa 150.



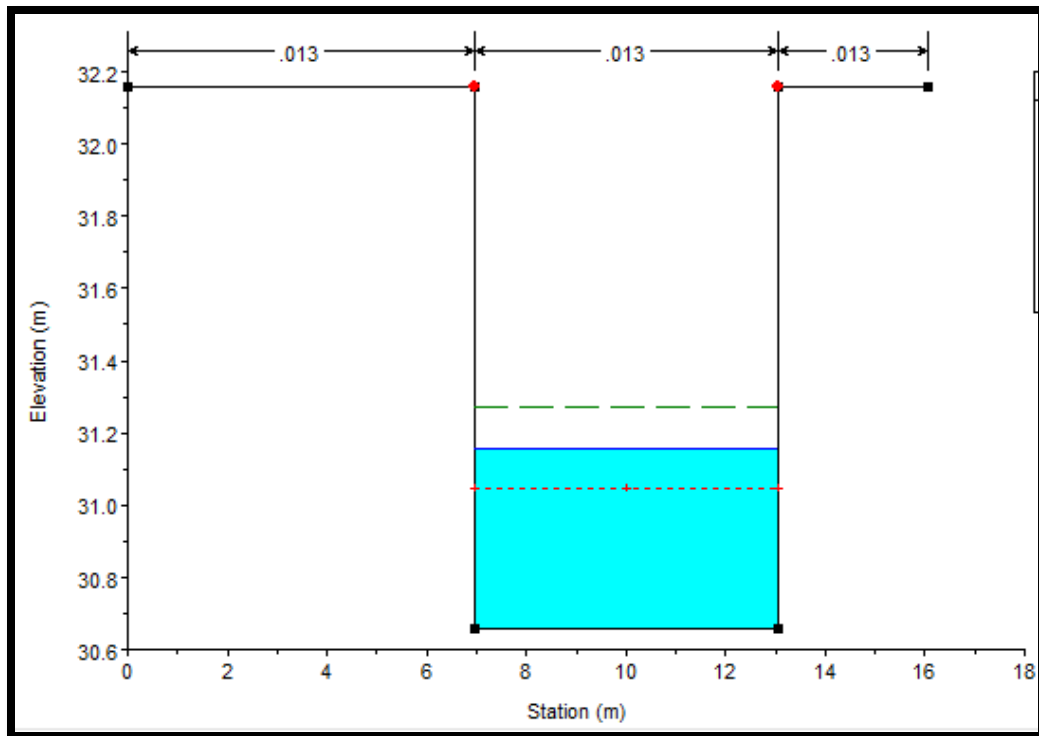


Figura 106. Sección transversal abscisa 0.

## 14. Presupuestos de alternativas de solución.

### 14.1 Sección trapezoidal alternativa de solución #1

**Tabla 47.**

*Presupuesto alternativa de solución #1 sección trapezoidal.*

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	V. UNITARIO	V.TOTAL
<b>CAP.1</b>	<b>PRELIMINARES</b>				
1.1	TRAZADO Y REPLANTEO	ML	1100	3750	\$ 4,125,000.00
1.2	DEMOLICION	M2	9594.50	38500	\$ 369,388,134.50
1.3	EXCAVACION	M3	4615.2509	18000	\$ 83,074,516.65
1.4	RELLENO	M3	47.4875	34000	\$ 1,614,575.00
1.5	COMPRA DE LOTES	M2	7670	447044	\$ 3,428,827,480.00
<b>CAP.2</b>	<b>CONSTRUCCION</b>				
2.1	CIMENTACION CICLOPEA	M3	494.45	115281	\$ 57,000,690.45
2.2	MURO DE CONCRETO (INCLUYE HIERRO Y FORMALETA)	M3	2966.7	789000	\$ 2,340,726,300.00
2.3	IMPERMEABILIZADO	M2	9594.50	42667	\$ 409,368,403.50
<b>SUB-TOTAL</b>					\$ 6,694,125,100.10
ADMINISTRACION				12%	\$ 803,295,012.01
IMPREVISTOS				8%	\$ 535,530,008.01
UTILIDAD				5%	\$ 334,706,255.00
IVA SOBRE UTILIDAD				19%	\$ 63,594,188.45
<b>TOTAL</b>					\$ 8,431,250,563.57

En este presupuesto se tuvo en cuenta el valor de compra de lotes que corresponde a un valor de \$ 447.044 (CUATRO CIENTO CUARENTA Y SIETE MIL CUARENTA Y CUATRO PESOS)<sup>40</sup>.

<sup>40</sup><https://casas.mitula.com.co/casas/aracataca>

**14.2 Sección rectangular alternativa de solución #2****Tabla 48.***Presupuesto alternativa de solución #2 sección rectangular.*

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	V. UNITARIO	V.TOTAL
<b>CAP.1</b>	<b>PRELIMINARES</b>				
1.1	TRAZADO Y REPLANTEO	ML	1100	3750	\$ 4,125,000.00
1.2	DEMOLICION	M2	9594.50	38500	\$ 369,388,134.50
1.3	EXCAVACION	M3	3949.0398	18000	\$ 71,082,717.03
1.4	RELLENO	M3	48.9875	34000	\$ 1,665,575.00
<b>CAP.2</b>	<b>CONSTRUCCION</b>				
2.1	CIMENTACION CICLOPEA	M3	336.6	115281	\$ 38,803,584.60
2.2	MURO DE CONCRETO (INCLUYE HIERRO Y FORMALETA)	M3	2895.552	789000	\$ 2,284,590,528.00
2.3	IMPERMEABILIZADO	M2	9594.497	42667	\$ 409,368,403.50
<b>SUB-TOTAL</b>					\$ 3,177,358,367.63
ADMINISTRACION				12%	\$ 381,283,004.12
IMPREVISTOS				8%	\$ 254,188,669.41
UTILIDAD				5%	\$ 158,867,918.38
IVA SOBRE UTILIDAD				19%	\$ 30,184,904.49
<b>TOTAL</b>					\$ 4,001,882,864.03

**14.3 Limpieza del canal #3****Tabla 49.***Presupuesto alternativa de solución #1 seccin trapezoidal.*

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	V. UNITARIO	V.TOTAL
<b>CAP.1</b>	<b>PRELIMINARES</b>				
1.1	LIMPIEZA DE SEDIMENTOS EN EL CANAL (INCLUYE LIMPIEZA EN LA TUBERIA)	GB	4	\$ 23,819,000.00	\$ 95,276,000.00
<b>SUB-TOTAL</b>					\$ 95,276,000.00
ADMINISTRACION				12%	\$ 11,433,120.00
IMPREVISTOS				8%	\$ 7,622,080.00
UTILIDAD				5%	\$ 4,763,800.00
IVA SOBRE UTILIDAD				19%	\$ 905,122.00
<b>TOTAL</b>					\$ 120,000,122.00

### **15. Resultados obtenidos.**

La limpieza es fundamental a la hora del funcionamiento de canales abiertos, ya que, el mantenimiento garantiza que la estructura hidráulica funcione correctamente. También ayuda a evitar inundaciones o desbordamientos. En este caso, el canal Tolima presenta sedimentos que evitan que éste funcione correctamente; es por esto que se planteó una limpieza en la modelación del Hec-Ras.

La problemática que presenta el Canal en las diferentes secciones transversales e irregulares, afianzan las calamidades a la hora del funcionamiento. Tampoco se debe descartar el material con el que está construido. Actualmente, está hecho en concreto, pero éste presenta un deterioro por la falta de mantenimiento y también por el ciclo de vida en el que se construyó. Teniendo en cuenta estos factores, se hizo la respectiva simulación que arrojó como resultado que el canal no tiene la capacidad total de recibir el caudal por aguas lluvias y el caudal de funcionamiento, es por eso que se presentan desbordamientos en algunos sectores a lo largo del canal.

Abarcado el impase, se llevó a cabo una calibración que obtuvo un porcentaje de error permisible permitiendo que el canal no se desbordara. Se concluye que el canal debe tener un mantenimiento preventivo para evitar que ocurran eventos de inundación y desbordamientos en el mismo. Obligatoriamente, se debe mantener el canal en óptimas condiciones para evitar futuros problemas que perjudiquen a los habitantes y que, además, el costo no sea elevado para solucionarlos.

## 16. Conclusiones

- La mejor opción de solución para el canal Tolima es hacer un mantenimiento preventivo para evitar la acumulación de sedimentos en el canal y así evitar inundaciones cuando hay crecientes de lluvias.
- El canal actualmente no se le ha hecho mantenimiento preventivo es por eso que hay acumulación de sedimentos, deterioros en gran parte del canal, también una pendiente baja y por las diferentes secciones transversales que tiene a lo largo del canal.
- Durante la calibración se identificaron los valores óptimos de los parámetros, para los cuales el modelo se comportaba de la mejor forma ante los resultados obtenidos teóricamente con Manning.
- Se realizó la comparación entre los resultados hallados a través de Manning y los corregidos luego de realizar el ajuste, observándose comportamientos muy similares al obtener un coeficiente de Manning distinto en varias de las secciones con la herramienta computacional Hec-ras.
- El caudal óptimo dado por la empresa encargada Usoaracataca fue comprobado por un sensor o medidor de caudal, la cual dio un resultado similar, medido en los puntos críticos del canal.
- El puente canal funciona perfectamente con la limpieza del canal a la hora de simular la condición actual calibrada.

## 17. Recomendaciones

- El borde libre debe tener un margen de seguridad en la operación de canales, conviene dejar un desnivel entre la superficie libre del agua para el tirante normal y la corona de los bordes entres 0.6 a 1 metro.
- Se recomienda una sola rugosidad en el canal. En el caso de la simulación, un concreto liso, el cual, cumpla con las condiciones que demanda el canal para así evitar futuros problemas.
- Se recomienda un mantenimiento preventivo 4 veces al año para evitar deterioros en el canal y que así tenga un mejor funcionamiento para una larga duración.
- Se recomienda una velocidad mínima de 0.5 mts/s para evitar sedimentos y máxima de 2.5 mts/s para evitar deterioro del canal.
- Se recomienda la instalación de una canaleta parshall al principio de la bocatoma para disminuir la cantidad de sedimentos que se acumulan el canal.

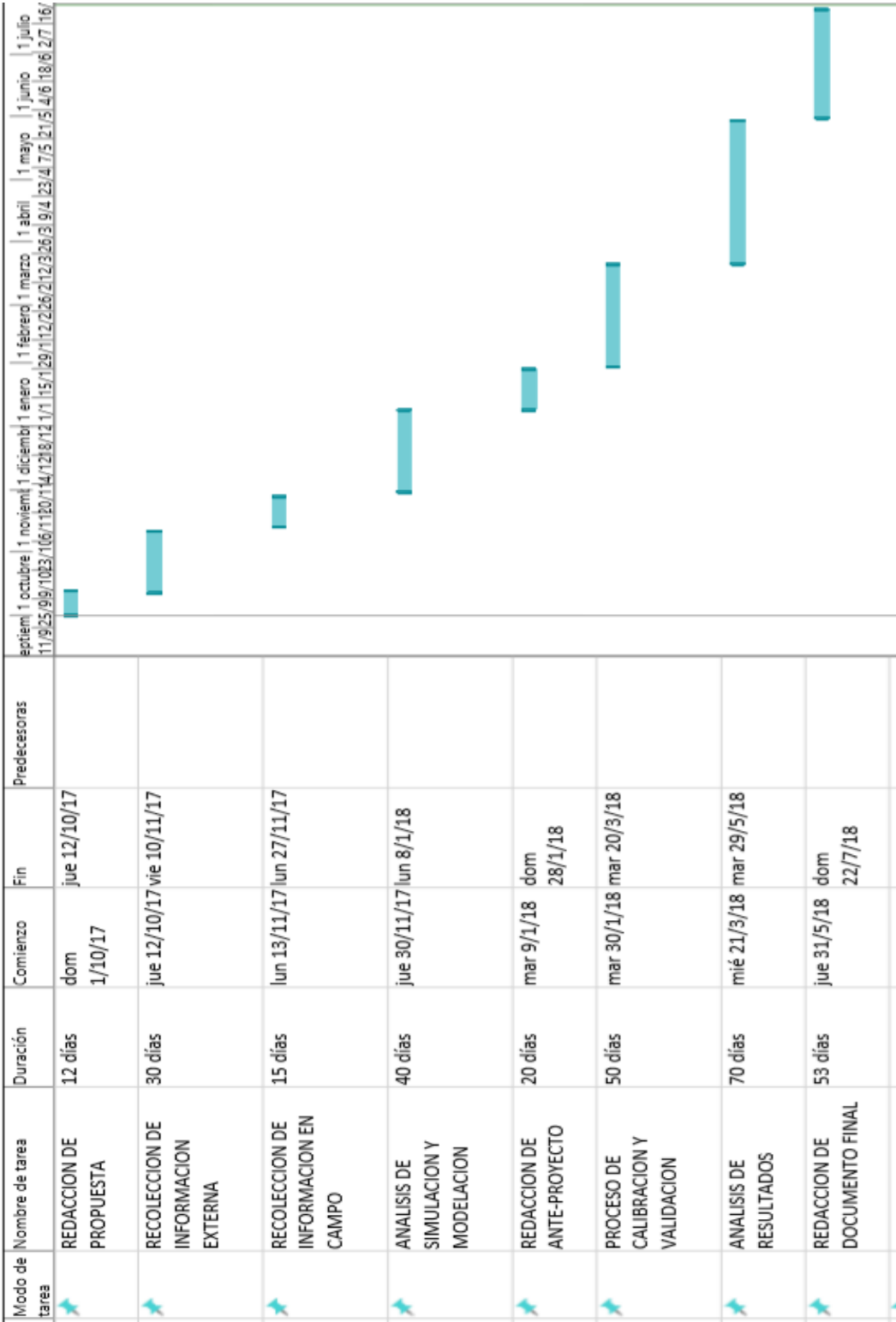
## 18. Recursos

Para el desarrollo del presente proyecto de investigación se utilizaron los siguientes recursos:

- Hec Ras
- Paquete de Office 2013.
- AutoCAD
- Cinta métrica.
- Cámara fotográfica.
- Computadores.
- Topografía Aqua estudios e ingeniería.
- Informe Aqua estudios e ingeniería.
- Equipo de medición de velocidad (sensor)



19. Cronograma



### Referencias

- Baume, J.-P., Malaterre, P.-O. & Dorchies, D., 2013. *Manual Simulador SIC<sup>2</sup> versión 5.30a (Simulation of Irrigation Canals)*, Fracia: Irstea.
- Brownlie, W.R. (1981). "Prediction of Flow Depth and Sediment Discharge in Open Channels", Report KH-R- 43A, California Institute Technology, Pasadena, U.S.A.
- E. BLADÉ y M. GÓMEZ, 2006. Modelación del Flujo en Lámina Libre sobre Cauces Naturales. Análisis Integrado en una y dos Dimensiones.
- E. BLADÉ, M. SÁNCHEZ-JUNY, H. P. SÁNCHEZ, D. ÑIÑEROLA, M. GÓMEZ, 2009: Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable. Una visión a partir del modelo HEC-RAS.
- Gleason, C.J , Smith, L.C., Lee, J. (2014) Retrieval of river discharge solely from satellite imagery and at-many-stations hydraulic geometry: Sensitivity to river form and optimization parameters.
- HEC RAS 5.0.3 Applications Guide, US Army Corps Of Engineers, 351 pp.
- HEC RAS 5.0.3 Hydraulic Reference Manual, US Army Corps Of Engineers, 417 pp.
- HEC RAS 5.0.3 User's Manual, US Army Corps Of Engineers, 790 pp.
- HEC RAS, release notes, US Army Corps Of Engineers, 21 pp.
- Hussain, M., Shakir, A. S. & Khan, N. M., Jan., 2013. Steady and Unsteady Simulation of Lower Bari Doab Canal using SIC Model. *Pak. J. Engg. & Appl. Sci*, Volumen 12, pp. 60-72
- Mendez, M. (2012). Calibración y validación del modelo hidrológico SWMM en cuencas hidrográficas de alta pendiente en Costa Rica. 26(2).
- MONSALVE, Germán. Hidrología en la Ingeniería. Escuela Colombiana de Ingeniería, 383 pp.
- Sánchez, L. (2009). Modelo hidrológico- hidráulico para evaluar un sistema de drenaje urbano en zonas planas.

SILVA, Gustavo. Hidrología Básica. Universidad Nacional de Colombia. 239 pp.

Sotelo, G. 2000, Hidráulica General. México D. F, Limusa 561p.

Vente Chow, David R. Maidment, Larry W .Mays; traducción Juan G. Saldarriaga (1994)  
Hidrología aplicada. Santa Fe de Bogotá, Colombia. McGraw-Hill

Vergara, MA.1993. Técnicas de Modelación en Hidráulica. Primera Edición. México D. F,  
Ediciones Alfaomega. 294p.